

В. В. СЕБКО, Є. В. ПИРОЖЕНКО, В. Г. ЗДОРЕНКО, Т. Б. НОВОЖИЛОВА, Д. І. НЕЧИПОРЕНКО

МЕТОДИ БАГАТОПАРАМЕТРОВОГО БЕЗКОНТАКТНОГО КОНТРОЛЮ ДЕТАЛЕЙ ОБЛАДНАННЯ ПИВОВАРНИХ АПАРАТІВ ТА ЗРАЗКІВ СТІЧНИХ ВОД

Проведеними дослідженнями сучасних питань техноекології в галузі пивоваріння встановлено необхідність прогнозування стану обладнання, якості напівфабрикатів продукції та готового продукту, створення алгоритмів виділення й оброблення інформації щодо показників якості, які відповідають міжнародним стандартам. Доведена необхідність розробки нових ефективних методів контролю обладнання пивоваріння, напівфабрикатів, готового продукту та стану зразків стічних вод. Завдяки цьому стане можливим одночасно визначати причини відхилення характеристик продукції від заданих показників якості та здійснювати заходи, виконуючі відповідне корегування. Експериментальними дослідженнями підтверджено, що завдяки апаратурним прийомам, пов'язаними з нагріванням зразка у процесі контролю та компенсацією впливу паразитного магнітного потоку, стає можливим сумісний контроль геометричних, електричних і температурних параметрів деталей обладнання пивоваріння. Це приводить до підвищення загальної вірогідності контролю параметрів. Зокрема встановлено, що таке зростання вірогідності відбувається за рахунок підвищення її інструментальної складової, унаслідок зменшення похибок вимірювань. Це дозволяє стверджувати, що визначення похибок сукупних вимірювань фізико-механічних параметрів деталей обладнання, надає змогу встановлювати раціональні режими роботи теплових багатопараметрових вихорострумових перетворювачів, підвищити вірогідність контролю деталей обладнання та суттєво підвищити якість управління технологічними процесами виготовлення продукції пивоваріння. Таким чином, є підстави стверджувати про перспективність подальших досліджень в створенні автоматизованих комп'ютерних систем контролю електричних та температурних характеристик напівфабрикатів продукції пивоваріння при реалізації нових інформативних методів.

Ключові слова: комп'ютерне моделювання; техноекологія; технологічний процес пивоваріння; інформативні методи; вихорострумові пристрої.

В. В. СЕБКО, Е. В. ПИРОЖЕНКО, В. Г. ЗДОРЕНКО, Т. Б. НОВОЖИЛОВА, Д. И. НЕЧИПОРЕНКО

МЕТОДЫ МНОГОПАРАМЕТРОВОГО БЕЗКОНТАКТНОГО КОНТРОЛЯ ДЕТАЛЕЙ ОБОРУДОВАНИЯ ПИВОВАРЕННЫХ АППАРАТОВ И ОБРАЗЦОВ СТОЧНЫХ ВОД

Проведенными исследованиями современных вопросов техноэкологии в области пивоварения установлена необходимость прогнозирования состояния оборудования, качества полуфабрикатов продукции и готового продукта, создание алгоритмов выделения и обработки информации по показателям качества, которые соответствуют международным стандартам. Доказана необходимость разработки новых эффективных методов контроля оборудования пивоварения, полуфабрикатов, готового продукта и состояния образцов стоковых вод. Благодаря этому станет возможным одновременно определять причины отклонения характеристик продукции от заданных показателей качества и осуществлять меры по соответствующей корректировке. Экспериментальными исследованиями подтверждено, что, благодаря аппаратурным приемам, связанных с нагревом образца в процессе контроля и компенсацией влияния паразитного магнитного потока, становится возможным совместный контроль геометрических, электрических и температурных параметров деталей оборудования пивоварения. Это приводит к повышению общей достоверности контроля параметров. В частности установлено, что такой рост вероятности происходит за счет повышения ее инструментальной составляющей, вследствие уменьшения погрешностей измерений. Это позволяет утверждать, что определение погрешностей совокупных измерений физико-механических параметров деталей оборудования, дает возможность устанавливать рациональные режимы работы тепловых многопараметровых вихреотокowych преобразователей, повысить достоверность контроля деталей оборудования и существенно повысить качество управления технологическими процессами изготовления продукции пивоварения. Таким образом, есть основания утверждать о перспективности дальнейших исследований в создании автоматизированных компьютерных систем контроля электрических и температурных характеристик полуфабрикатов продукции пивоварения при реализации новых информативных методов.

Ключевые слова: компьютерное моделирование; техноэкология; технологический процесс пивоварения; информативные методы; вихреотокowe устройства.

V. SEBKO, Y. PYROZHENKO, V. ZDORENKO, T. NOVOZHILOVA, D. NECHIPORENKO

METHODS OF NON-CONTACT PARAMETRIC CONTROL OF EQUIPMENT OF BREWING APPARATUS AND WASTE WATER SAMPLES

The studies of technoecology problems in the field of brewing established the need to predict the condition of equipment, the quality of semi-finished products, as well as the creation of algorithms for extracting and processing information on quality indicators. The necessity of developing new effective methods for monitoring brewing equipment, semi-finished products, finished products and the state of stock water samples has been proved.

© В. В. Себко, Є. В. Пироженко, В. Г. Здоренко, Т. Б. Новожилова, Д. І. Нечипоренко, 2020

Thanks to this, it will become possible to determine the reasons for the deviation of the product characteristics from the set quality indicators and to take measures for appropriate adjustment. Experimental studies have confirmed that, thanks to the allocation of important informative parameters, it becomes possible to increase the overall component of the reliability of control. This leads to an increase in the quality of the finished product. In particular, it was found that due to the hardware techniques associated with heating the sample during the control process and compensating for the influence of the parasitic magnetic flux, it becomes possible to carry out joint control of quantitative parameters that are related to the physicochemical properties of equipment parts, assemblies and designs of the beer column. The latter, in particular, relates to the implementation of joint control of the geometric, electrical and temperature parameters of parts of brewing equipment.

Thus, there is reason to argue about the prospects of further research in the creation of automated computer systems for monitoring the electrical and temperature characteristics of semi-finished brewing products when implementing new informative methods.

Keywords: computer simulation; technoeology; brewing process; informative methods; eddy current devices.

Вступ

На сьогодні, виникає необхідність проведення заходів щодо модернізації виробництва та вдосконалення системи керування на сучасній технологічній основі, шляхом комп'ютерного моделювання, а також за рахунок сучасних вимог до стандартів охорони оточуючого середовища та якості продукції [1–5]. Високий рівень споживання при виробництві продукції пивоваріння, обумовлює великий обсяг утворення стічних вод, які мають високу ступінь забрудненості і становлять небезпеку для навколишнього середовища. Всі ці завдання є найбільш актуальними для вітчизняної промисловості. В державах ЄС успішний розвиток галузі, традиційно пов'язано з напрямками комплексного використання сировини, створенням маловідходних технологічних процесів виробництва продукції пивоваріння [1, 2]. В сукупність питань, які потребують подальшого розвитку, входять завдання удосконалення процесів підготовки рослинної сировини, які забезпечують значне пом'якшення процесів та режимів варіння, зменшення втрат заброджених цукрів, оптимізації процесів ферментації, культивування дріжджів та безумовно найважливішими є питання, які пов'язано зі створенням надійного та ремонтпридатного обладнання, експлуатаційні та технологічні характеристики якого надають можливість щодо створення екологічно-чистої продукції.

В умовах виробничих навантажень обладнання пивоваріння, особливо важливим є контроль геометричних, електричних та температурних параметрів деталей досить недешевого обладнання пивоваріння: циліндрів трієрів, з'єднувальних трубок, конічних ферментерів, трубчастих дефлегматорів, трубчатих змішувачів, чилерів для охолодження суслу, циліндроконічних танків, корпусів баків, редукторів дріжджового осаду та інших деталей та конструкцій обладнання циліндричної форми [1, 2].

Під час контролю якості напівфабрикатів продукції пивоваріння, готового продукту й ступеня забрудненості стічних вод, які надходять у міську каналізацію, є необхідним оцінювання електричних та температурних параметрів, які пов'язано з концент-

рацією та вмістом заброджених цукрів, білків, хмелевих кислот, складних ефірів [1–3]. Досліджувані параметри також містять інформацію щодо інших фізико-хімічних характеристик, які пов'язано з нормативними показниками відповідних міжнародних екологічних стандартів, тобто показниками пов'язаними з вимогами щодо запобігання забрудненню навколишнього природного середовища та методами контролю за станом навколишнього середовища, які застосовують у міжнародній практиці [3].

Таким чином, при вивченні сучасних питань техноекології в галузі пивоваріння, залишається актуальною загальна проблема прогнозування стану обладнання, якості напівфабрикатів та готового продукту, створення алгоритмів виділення й оброблення інформації щодо показників якості, які відповідають міжнародним стандартам. Слід визначити, що сучасна технологічна система відображується конкретною математичною моделлю зі застосуванням широкого спектру методів контролю кількісних параметрів об'єктів, на основі яких визначають характеристики технологічної системи та виявляють порушення техноекології.

Таким чином, за рахунок використання допоміжних інформативних методів, приладів та систем стає можливим одночасно визначати причини відхилення характеристик продукції від заданих показників якості та здійснювати заходи виконуючі відповідне корегування.

1. Аналіз літературних даних та постановка проблеми

В сучасній технічній літературі були розглянуті вихорострумові методи та пристрої на основі вихорострумових первинних перетворювачів для багатопараметрового контролю магнітних та немагнітних виробів циліндричної форми, а також зразків рідинних середовищ [6–9]. Слід визначити, що труднощі розробки теплових вихорострумових пристроїв були пов'язані також зі створенням складного математичного апарату, який би у достатній мірі надавав можливості обґрунтування залежностей геометричних,

електромагнітних і температурних параметрів зразків обладнання від компонентів сигналу теплового ВТП. При цьому застосування на виробництві контактних засобів термометрії пов'язано також з неточностями вимірювань температурних параметрів, тому що контактні засоби термометрії здатні вимірювати температуру тільки на поверхні зразка, а вихороструміві засоби надають змогу контролювати температуру у внутрішніх шарах зразку, на поверхні зразку та середню за перетином виробу температуру зразку [6]. В роботі [7], розроблено алгоритм сумісного визначення електричних і температурних параметрів проби харчового барвника за допомогою схеми автоматизованого вимірювального контролю електричних і температурних параметрів при реалізації двопараметрового електромагнітного методу [7]. Однак слід зазначити, що в даній роботі не наведено можливості здійсненні трипараметрового контролю. Це означає, що не визначені всі інформативні параметри, які найбільш у повному обсязі описують електрофізичні властивості об'єкта випробувань. З практичної точки зору це може викликати труднощі, що пов'язані з визначенням оптимальної кількості цих параметрів, адже досліджувані параметри містять інформацію щодо інших фізико-хімічних характеристик, які пов'язано з нормативними показниками відповідних міжнародних екологічних стандартів.

Для подолання цієї проблеми в роботі [8], наведено теоретичні залежності, які зв'язують електричні параметри контактного вихорострумівого перетворювача з температурними та технологічними параметрами немагнітних хімічних розчинів. Показано, що завдяки встановленим аналітичним залежностям стає можливим розширення функціональних і технічних можливостей теплового контактного вихорострумівого методу стосовно до вимірювального контролю параметрів розчинів кислот. Незважаючи на практичну значущість таких результатів, не розглянуто можливість безконтактного методу контролю, адже застосування на виробництві контактних засобів термометрії пов'язано, зазвичай, з неточностями вимірювань температурних параметрів. В роботі [9], показано, що підвищення точності вимірювань температури немагнітних плоских виробів відбувається за рахунок розроблених алгоритмів вимірювальних та розрахункових процедур, які містять операції з прирощеннями компонентів сигналів теплових електромагнітних перетворювачів. Однак слід зазначити, що в даній роботі не наведені шляхи встановлення оптимальних режимів роботи теплового трансформаторного електромагнітного перетворювача з плоскими

виробами, що контролюються. З практичної точки зору це може викликати зниження вірогідності контролю. Питання підвищення вірогідності контролю було розглянуто в роботі [10], в якій досліджується система імпульсного вихрового струму для виявлення несправностей за допомогою обертової котушки на сталевій трубі. Однак, незважаючи на суттєвий внесок цієї наукової праці, питання підвищення вірогідності контролю кількісних параметрів деталей, які пов'язано з інструментальною складовою цієї важливої характеристики, практично залишаються без суттєвої уваги. Дана обставина пов'язана з тим, що зниження інструментальної складової вірогідності контролю обумовлює збільшення похибок вимірювань кількісних параметрів зразків обладнання.

Однією з причин зниження інструментальної складової вірогідності контролю є недостатня чутливість датчика. Як зазначається в роботі [11], доцільність підвищення чутливості детектування зонда підтверджується покращенням вимірювальних параметрів. Ще одним варіантом підвищення точності, який був представлений в роботі [12], є оптимізація датчика імпульсного вихрового струму. Дослідженнями, що були проведені в роботі [13], встановлено, що для чутливості та точності вимірювань було запропонована методика використання імпульсно-модуляційної вихорострумівого техніки. Однак слід зазначити, що в даних роботах не наведені теоретичні положення, пов'язаних з теорією оцінювання похибок сукупних вимірювань інформативних сигналів перетворювачів та фізико-механічних характеристик об'єктів дослідження. Вочевидь це пов'язано з тим, що є відсутній загальний підхід відносно оцінювання похибок сукупних вимірювань геометричних, електричних та температурних параметрів деталей обладнання харчових виробництв при реалізації багатопараметрових методів вихорострумівого неруйнівного контролю. Тобто теоретичні основи визначення систематичних похибок вимірювання функцій багатьох змінних, які представляють собою залежності нормованих характеристик перетворювачів (ЕРС, фазових кутів зсуву, частот магнітного поля та інших компонентів сигналу) від важливих інформативних параметрів об'єкта контролю (зовнішніх та внутрішніх радіусів труб, довжини та ширини з'єднувальних елементів, температури деталей обладнання та з'єднувальних одиниць, тощо) – потребує подальшого розвитку.

Тому є підстави вважати, що недостатня визначеність теоретичних положень роботи вихорострумівого пристрою та реалізація трипараметрового безконтактного методу контролю геометричних, електричних і

температурних параметрів, обумовлюють необхідність проведення досліджень в цьому напрямку.

2. Ціль та задачі дослідження

На теперішній час, відсутні теоретичні положення й методологія створення теплових вихорострумів багатопараметрових пристроїв та методів контролю кількісних характеристик деталей обладнання пивоваріння. На сьогодні, також не розглянуто можливості підвищення точності вимірювань температури зразка обладнання, проби напівфабрикату, готового продукту та зразків стоків стічних вод за рахунок реалізації багатопараметрових вихорострумів методів розроблених на основі вимірювальних та розрахункових процедур, які засновано на моделюванні температурних полів у середині зразка.

Не розроблено прості алгоритми контролю напівфабрикатів пивоваріння та готового продукту в залежності від застосування температурних пауз.

Проведені дослідження ставили за мету дослідження теоретичних положень роботи вихорострумів пристрою при реалізації безконтактного методу контролю деталей обладнання пивоваріння за допомогою комп'ютерного моделювання, а також дослідження можливостей застосування вихорострумів перетворювача для контролю електричних та температурних параметрів зразків напівфабрикатів продукції пивоваріння та стічних вод пивоварного виробництва.

Для досягнення мети необхідно вирішити наступні завдання:

- отримати основні співвідношення, які описують теоретичні положення роботи теплового вихорострумів трансформаторного перетворювача (ВТП) з деталями обладнання пивоваріння циліндричної форми;

- навести алгоритми моделювання процесу вимірювального контролю діаметра d , питомої електричної провідності σ (питомого електричного опору ρ) та температури t деталей обладнання пивоваріння;

- за допомогою апаратних прийомів, пов'язаних з нагріванням зразка у процесі контролю та компенсацією впливу паразитного магнітного потоку (який проходить у повітряному проміжку між зразком та чутливим елементом вихорострумів перетворювача), розробити алгоритми вимірювальних і розрахункових процедур щодо сумісного контролю геометричних, електричних і температурних параметрів деталей обладнання пивоваріння;

- дослідити теоретичні положення оцінювання похибок сукупних вимірювань геометричних, електричних і температурних параметрів зразка, при реалі-

зації теплового багатопараметрового вихорострумів методу;

- дослідити можливість застосування теорії роботи ВТП стосовно контролю електричних та температурних параметрів зразків стічних вод, які утворюються внаслідок виготовлення продукції пивоварної галузі.

3. Матеріали та методи дослідження багатопараметрових процесів управління

3.1. Досліджувані матеріали та обладнання, що використовувались в експерименті.

Дослідження проводили з використанням теплового ВТП з деталями обладнання пивоваріння циліндричної форми.

Експериментальні параметри зразка деталі обладнання циліндричної форми: діаметр $d = 10 \cdot 10^{-3}$ м, довжина $l = 0,40$ м, питомий електричний опір $\rho = 1,75 \cdot 10^{-8}$ Ом·м, температурний коефіцієнт опору $\alpha = 4,3 \cdot 10^{-3}$ 1/К (матеріал мідь М1). Параметри ВТП були наступні: $f_1 = 60,0$ Гц, ЕРС теплового ВТП при відсутності зразка $E_0 = 75$ мВ, довжина намагнічувальної обмотки $l_H = 0,35$ м, діаметр намагнічувальної обмотки $d_H = 13 \cdot 10^{-3}$ м. Трипараметровий контроль здійснювався під час підтримання сталого значення частоти магнітного поля $f_1 = 60,0$ Гц, при малих значеннях узагальненого параметра $x \leq 1,2$ та при збільшенні параметра x (при $x \geq 4,8$), внаслідок зростання частоти теплового ВТП.

3.2. Метод трипараметрового контролю деталей обладнання пивоваріння

Слід визначити, що для підвищення загальної складової вірогідності контролю $D_{\text{заг.}}$, необхідно створення теоретичних положень роботи ВТП зі зразками деталей обладнання під час реалізації багатопараметрових вихорострумів методів. При цьому, підвищення методичної складової вірогідності контролю D_m обумовлено збільшенням кількості параметрів, які підлягають контролю. У свою чергу, підвищення інструментальної складової вірогідності контролю D_i , обумовлено зменшенням похибок вимірювань кількісних параметрів зразків обладнання (за рахунок зменшення похибки, обумовленою нагріванням зразка вихровими струмами, теплопровідністю структурних складових обладнання та оточуючого середовища, вхідною величиною потужності тепла, що надходить до зразка, величини струму, який нагріває обвитки перетворювача). Таким чином, все це має вплив на інструментальну складову вірогідності контролю геометричних, електричних та температурних параметрів

зразків деталей обладнання, що контролюються.

Нижче досліджено трипараметровий метод та реалізуючий його тепловий вихорострумний пристрій для сумісного інформативного контролю діаметра d , питомої електричної провідності σ (питомого електричного опору ρ) та температури t деталей обладнання пивоваріння. У роботах [6–9] введено параметр N , який характеризує собою різницеву нормовану вносиму ЕРС ВТП $E_{\text{внт}}$

$$E_{\text{внт}} = E_{\Sigma t} - E_0, \quad (1)$$

де E_0 і $E_{\Sigma t}$ – ЕРС теплового ВТП при відсутності зразка та сумарна ЕРС (індекс t свідчить, що досліджувана величина є температурозалежною).

При цьому фазовий кут зсуву $\varphi_{\text{внт}}$ параметра N для зразка обладнання циліндричної форми, визначають за допомогою співвідношень [6–13]:

$$N_t = \frac{E_{\text{внт}} d_n^2}{E_0 d^2}; \quad (2)$$

$$\arctg \varphi_{\text{внт}} = -\frac{1 - k_t \cos \varphi_t}{k_t \sin \varphi_t}, \quad (3)$$

де d_n – діаметр вимірювальної обвитки перетворювача, k_t – питома нормована характеристика, яка пов'язана з електричними та магнітними властивостями зразка.

Формула для визначення комплексного параметра N має вигляд [6–14]

$$N = \frac{2}{d} \frac{I_1(x\sqrt{j})}{\sqrt{2\pi\mu_0 f \sigma} \sqrt{j} I_0(x\sqrt{j})}, \quad (4)$$

де x – термозалежний узагальнений параметр; μ_0 – магнітна стала; f – частота змінення зондуючого магнітного поля; σ – питома електрична провідність зразка; I_1 та I_0 – модифіковані функції Беселя першого роду, першого та нульового порядків; j – комплексне число [6–13].

Далі за допомогою комп'ютерного моделювання, необхідно навести наближені вирази, які пов'язують температуру t з характеристиками N і φ на фіксованій частоті магнітного поля f_1 та у наближенні для низьких і високих значень узагальненого параметра x .

У випадку підтримання сталої частоти магнітного поля $f_1 = 60,0$ Гц, діаметр зразка d , який підлягає нагріванню у процесі контролю, визначають за функцією перетворення $N_t = f(\varphi_{\text{внт}})$:

$$d = d_n \sqrt{\frac{E_{\text{внт}}}{E_0 N_t}}. \quad (5)$$

Далі знаходять питому електропровідність σ_t , за формулою

$$\sigma_t = \frac{x_t^2 E_0 N_t}{\mu_0 d_n^2 E_{\text{внт}} \pi f}. \quad (6)$$

З урахуванням залежності питомого електричного опору ρ_t від температури t , маємо

$$\frac{\rho_t}{\rho_1} - 1 = \frac{\alpha t}{1 + \alpha t_1} - \frac{\alpha t_1}{1 + \alpha t_1}, \quad (7)$$

де t_1 – початкова температура, $t_1 = 20^\circ\text{C}$.

Формула для визначення температури зразка t , що контролюється через питомий електричний опір ρ , має наступний вигляд

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

де α – температурний коефіцієнт опору.

При цьому при високих значеннях узагальненого параметра x трипараметровий контроль здійснюється на поверхні зразка, при малих значеннях x контролюють значення середніх по перетину геометричних, електричних та температурних параметрів і на фіксованій частоті магнітного поля – отримують інформацію стосовно діаметра d , питомого електричного опору ρ та температури t з певної глибини проникнення Δ магнітного поля у зразок, що контролюється.

Формула визначення температури для низьких значень узагальненого параметра x ($x \leq 1,2$) має наступний вигляд

$$t = \left(\sqrt{\frac{1 - N_1}{1 - N}} - 1 \right) \left(\frac{1 + \alpha t_1}{\alpha} \right) + t_1, \quad (9)$$

де N_1 – відповідає значенню x_1 , при $t = t_1$.

Застосувавши залежність фазового кута зсуву поміж магнітним потоком Φ_0 та параметром N , маємо

$$t = \left(\frac{\text{tg} \varphi_1}{\text{tg} \varphi} - 1 \right) \left(\frac{1 + \alpha t_1}{\alpha} \right) + t_1, \quad (10)$$

де φ_1 – вимірюють при x_1 .

При збільшенні значень узагальненого параметра $x \geq 4,8$, отримаємо

$$t = \left(\frac{4N_1^2}{x^2} - 1 \right) \left(\frac{1 + \alpha t_1}{\alpha} \right) + t_1. \quad (11)$$

При збільшенні значень узагальненого параметра x , залежність температури зразка обладнання t від $\text{tg} \varphi$, має наступний вигляд

$$t = \frac{1 - \text{tg} \varphi}{1 - \text{tg} \varphi_1} \frac{1 + \alpha t_1}{\alpha} + t_1. \quad (12)$$

4. Результати сумісного вимірювального контролю

На рис. 1, з урахуванням результатів робіт [6–13], наведена схема включення теплового ВТП для контролю геометричних, електричних і температур-

них параметрів деталей обладнання.

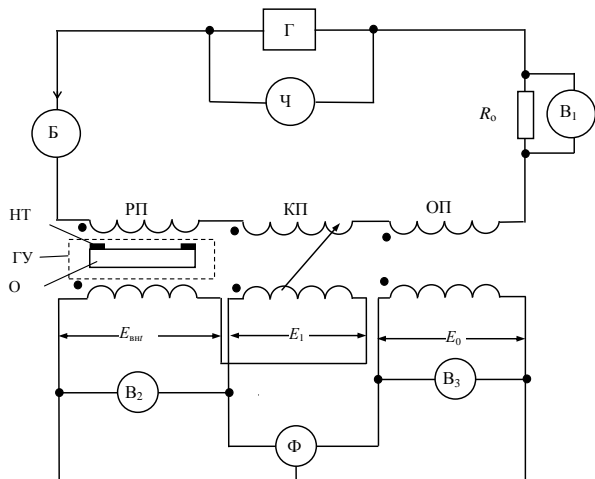


Рисунок 1 – Схема включення теплового ВТП зі зразком, що контролюється

У схему входить: робочий перетворювач – РП; генератор – Г; частотомір – Ч; баретер – Б; вольтметри – V_1 , V_2 і V_3 ; зразковий опір – R_0 ; фазометр – Ф; опорний вихорострумний перетворювач – ОП. Схема також містить компенсаційний вихорострумний перетворювач – КП, при цьому РП, КП і ОП мають однакове число витків, а також геометричні параметри первинних і вторинних обмоток (первинні обмотки РП, КП і ОП увімкнено послідовно – узгоджено, а вторинні РП і КП послідовно – зустрічно). КП призначено для компенсації паразитної ЕРС E_1 при відсутності в РП зразка обладнання [6]. Схема також передбачає нагрівач Н для імітації процесу нагрівання зразка в діапазоні від 20 до 160 °С. В якості контрольного методу для вимірювання температури було застосовано нікелеві терморезистори – НТ, які закріплено на поверхні зразка (на обох кінцях зразка та посередині).

Спочатку схема налаштовується наступним чином: під час відсутності в РП зразка сигнал, який реєструється вольтметром V_2 , дорівнює нулю, далі операція компенсації ефекту впливу повітряного проміжку здійснюється добором витків вторинної обмотки КП. При цьому, ЕРС E_0 реєструється вольтметром V_3 .

Таким чином, на виході вторинної обмотки котушки взаємодуктивності КП виникає ЕРС E_{20} , котра дорівнює ЕРС двох зустрічно увімкнутих обмоток РП та КП. При уміщенні в РП зразка з'являється різниця ЕРС $E_{\text{вн}}$, яку визначають за допомогою вольтметра V_2 . Фазовий кут зсуву $\varphi_{\text{вн}}$, вимірюють фазометром Ф. Тепловий ВТП виконує одночасно наступні функції: створює корисний магнітний потік Φ_{2t} в зразку обладнання, забезпечує реєстрацію ЕРС $E_{\text{вн}}$, а також забезпечує змінення температури зразка в процесі

контролю за допомогою нагрівача – Н, розташованого безпосередньо у ВТП. Таким чином, під час роботи схеми вимірюють залежну від температури різницеву ЕРС $E_{\text{вн}}$ за допомогою вольтметра V_2 , після цього реєструють за допомогою Ф фазовий кут зсуву $\varphi_{\text{вн}}$ між ЕРС E_0 і $E_{\text{вн}}$. Намагнічувальний струм визначають за допомогою вольтметра V_1 .

У схемі на рис. 1, також передбачено стабілізатор струму Б для усунення джерела похибки вимірювання термозалежних параметрів ВТП $E_{\text{вн}}$ і $\varphi_{\text{вн}}$, внаслідок впливу температури зовнішнього середовища та нагріву зразка від ВТП, що в свою чергу, призводить до підвищення вірогідності контролю $D_{\text{заг.}}$, внаслідок збільшення її інструментальної складової D_i [13]:

$$D_{\text{заг.}} = D_i D_m. \quad (13)$$

Слід визначити, що компоненти сигналів, а також відносні нормовані характеристики теплового ВТП у даному випадку є температурозалежними, оскільки такий вимірювальний контроль передбачає нагрів зразка в процесі контролю (для імітації процесу нагрівання деталей в умовах експлуатації обладнання пивоваріння). Під час досліджень у якості контрольних методів було застосовано мікрометричний метод вимірювання діаметра d на основі застосування електронного цифрового мікрометра МКЦ, для визначення температури t – терморезистивний метод, який реалізується на базі трьох нікелевих терморезисторів НТ, для визначення питомого електричного опору ρ – електровимірювальний міст. В табл. 1, на основі комп'ютерного моделювання надано результати сумісного вимірювального контролю діаметра d , питомого електричного опору ρ та температури t мідного зразка в діапазоні температур від 20 до 160 °С та результати визначення термозалежних сигналів теплового ВТП. У табл. 1 також наведено значення діаметра d' , питомого електричного опору ρ' та температури t' досліджуваного мідного зразка, які було визначено контрольними методами та знайдені чисельні значення похибок вимірювань питомого електричного опору γ_ρ і температури γ_t .

Як видно з даних табл. 1, чисельні значення d і d' практично не змінюються зі зростанням значень температури, тому що температурний коефіцієнт лінійного розширення міді є достатньо малим (10^{-13} – 10^{-15} 1/К).

Таблиця 1 – Результати вимірювального контролю зразка деталі обладнання циліндричної форми

$t, ^\circ\text{C}$	$\rho_f \cdot 10^{-8},$ Ом·м	$\Phi_{\text{внн}},$ град	d	N_t	$E_{\text{внн}},$ мВ	$d',$ мм	$t', ^\circ\text{C}$	$\rho' \cdot 10^{-8},$ Ом·м	$\gamma_t, \%$	$\gamma_p, \%$
15,60	1,721	36,01	10,003	0,62	23,31	10,001	16,00	1,729	-2,50	-0,46
40,42	1,851	34,32	10,005	0,61	22,85	10,001	40,00	1,858	1,05	-0,38
67,61	1,875	33,68	10,007	0,60	21,54	10,002	68,00	1,869	-0,57	-0,32
82,17	2,129	33,05	10,004	0,59	21,18	10,001	82,00	2,126	0,207	0,14
107,80	2,180	32,10	10,006	0,58	21,02	10,001	108,00	2,177	-0,19	0,14
129,05	2,400	31,80	10,004	0,57	20,81	10,002	128,98	2,397	0,05	0,13
146,89	2,538	31,01	10,004	0,56	20,34	10,003	147,00	2,540	-0,07	-0,08
159,97	2,678	30,60	10,005	0,55	20,18	10,001	160,00	2,680	-0,02	-0,07

5. Дослідження можливості застосування теорії роботи ВТП стосовно контролю електричних та температурних параметрів зразків стічних вод, які утворюються внаслідок виготовлення продукції пивоварної галузі

Виробничі стічні води на підприємствах пивоварної галузі слід віднести до класів концентрованих. Найбільш забрудненими стічними водами є води, які утворюються від миття збіжжя, відпрацьованого хмелю, а також від миття фільтрованої маси після фільтрації відпрацьованого суслу. Також стічні води утворюються внаслідок миття технологічного обладнання, миття котлів для варки суслу, зображувальних чанів, бочок та інших ємностей, унаслідок залпових викидів та проливання напівфабрикатів та пива [15, 16]. Слід визначити, що зразки стічних вод, слід віднести до слабких електролітів, які мають в загальному випадку лужний характер, проведені дослідження надають змогу стверджувати, що потрібно підтримувати досить високі значення частот при реалізації вихорострумів методів, $f = 35\text{--}40$ МГц. При цьому для слабких електролітів узагальнений параметр x з ростом температури також збільшується, оскільки збільшу-

ється питома електрична провідність σ . Формули для визначення узагальненого магнітного параметра x , питомої електричної провідності σ та температури t , мають наступний вигляд

$$x = a \sqrt{2\pi \mu_0 f c \cdot \lambda / 1000 m}, \quad (14)$$

де μ_0 – магнітна стала; c – концентрація домішок; λ – еквівалентна електрична провідність зразка рідини; m – молярна маса.

Далі електропровідність σ та температуру t зразка рідини визначають за формулами:

$$\sigma = \frac{x^2}{\mu_0 \alpha^2 2\pi f}; \quad (15)$$

$$t = \left(\frac{x_t^2}{x^2} - 1 \right) \left(\frac{1 + \alpha t_1}{\alpha} \right) + t_1. \quad (16)$$

В табл. 2 наведено результати вимірювань нормованих сигналів перетворювача та електричних і температурних параметрів зразка стічних вод.

Таблиця 2 – Результати визначення електричних та температурних параметрів зразка стічних вод

$t, ^\circ\text{C}$	$\sigma_f \cdot 10^{-1},$ См·м	$\Phi_2,$ град	N_t	x
20	1,26	6,47	0,9893	0,96
22	1,46	6,65	0,9886	0,97
24	1,63	6,84	0,9872	0,99
26	1,84	6,91	0,9865	1,01
28	2,14	7,20	0,9853	1,02
30	2,48	7,45	0,9844	1,03
32	2,74	7,74	0,9831	1,05
34	2,96	8,01	0,9820	1,07

6. Обговорення отриманих результатів роботи вихорострумового пристрою на базі реалізації трипараметрового безконтактного методу

Таким чином, технологічні процеси, які пов'язано з виготовленням продукції пивоваріння є багатофакторними процесами управління. Для керування такими технологічними процесами необхідна розробка багатоканальних систем, які забезпечують внесення впливів керуючих операцій на характеристики обладнання, напівфабрикату та готового продукту, а також можливість запобігання відхиленню параметрів технологічного процесу пивоваріння, шляхом комп'ютерного моделювання. При застосуванні контрольних-випробувальних комплексів та реалізації комп'ютерного моделювання виробничих процесів необхідно виділяти важливі інформативні параметри, які найбільш у повному обсязі описують електрофізичні властивості об'єкта випробувань. В якості таких параметрів при випробуваннях виробів та деталей обладнання пивоваріння під час моделювання екологічних ситуацій, пов'язаних з процесами урбанізації та руйнуванням природного середовища районів великих міст, ефективно повинні бути врахованими: питома електрична провідність σ і температура t об'єкту що контролюється. Саме ці параметри несуть інформацію про характеристики міцності, результати впливу різних обробок при виготовленні обладнання пивоваріння (механічних, термічних тощо), дефектах деталей установок пивоваріння та обладнання під час їхньої експлуатації, а також є інформативними при комплексному визначенні складу стічних вод. З табл. 1 випливає, що данні досліджуваного інформативного вихорострумового методу, який реалізуються на основі комп'ютерного моделювання і дані відомих контрольних методів технічних вимірювань достатньо узгоджені поміж собою. При цьому, у загальній сукупності інформативних методів, методи вихорострумового неруйнівного контролю, зарекомендували себе як надійний інструмент управління якістю під час виробництва та експлуатації деталей обладнання харчових виробництв. При цьому для слабких електролітів узагальнений параметр x з ростом температури також збільшується, оскільки збільшується питома електрична провідність σ . В табл. 2 наведено результати вимірювань нормованих сигналів перетворювача та електричних та температурних параметрів зразка стічних вод. Аналізуючи результати досліджень можна зробити висновок, що для слабких електролітів узагальнений параметр x з ростом температури також збільшується, оскільки збільшується питома електрична провідність σ .

Науковою новизною статті є дослідження теоретичних положень роботи вихорострумового пристрою та реалізація безконтактного методу контролю деталей обладнання пивоваріння, які враховують режими здійснення сумісного трипараметрового контролю: при високих значеннях узагальненого параметра x (при цьому трипараметровий контроль здійснюється на поверхні зразка), при малих значеннях x (при цьому, контролюють значення середніх по перетину геометричних, електричних, температурних параметрів) і на фіксованій частоті магнітного поля (отримують інформацію стосовно діаметра d , питомого електричного опору ρ та температури t з певної глибини проникнення магнітного поля у зразок Δ). Досліджено можливість застосування теорії роботи ВТП стосовно контролю електричних та температурних параметрів зразків стічних вод, які утворюються внаслідок виготовлення продукції пивоварної галузі.

Практичним значенням роботи являється підвищення загальної вірогідності контролю $D_{\text{заг}}$ параметрів деталей обладнання пивоваріння за рахунок підвищення її інструментальної складової D_i , унаслідок зменшення похибок вимірювань за рахунок апаратних прийомів та на основі комп'ютерного моделювання трипараметрового контролю деталей обладнання пивоваріння.

Висновки

В статті було досліджено теоретичні положення роботи вихорострумового пристрою та реалізація безконтактного методу контролю деталей обладнання пивоваріння, які враховують три режими роботи, що у свою чергу, сприяє підвищенню вірогідності контролю характеристик деталей обладнання пивоваріння. В результаті застосування інформативного методу та алгоритмів комп'ютерного моделювання контролю характеристик деталей обладнання в екологічно чистому виробництві продукції пивоваріння було отримано наступне:

1. Отримані основні співвідношення, які описують теоретичні положення роботи теплового ВТП з деталями обладнання пивоваріння циліндричної форми з метою підвищення загальної складової вірогідності контролю.

2. Наведено алгоритми моделювання процесу вимірювального контролю діаметра d , питомої електричної провідності σ (питомого електричного опору ρ) та температури t зразка. Саме ці параметри несуть інформацію про характеристики міцності, результати впливу різних обробок, дефектах деталей, а також включають до себе дані щодо якості напівфабрикату,

готового продукту та є інформативними при комплексному визначенні складу стічних вод.

3. За допомогою апаратних прийомів по нагріванню зразка та по застосуванню компенсації впливу паразитного магнітного потоку (який проходить у повітряному проміжку поміж зразком та чутливим елементом вихорострумowego перетворювача), розроблено алгоритм вимірювальних і розрахункових процедур щодо сумісних вимірювань. Вимірювальний контроль геометричних, електричних і температурних параметрів деталей циліндричної форми обладнання пивоваріння здійснювався при сталому значенні частоти магнітного поля $f_1 = 70,0$ Гц, при малих значеннях узагальненого параметра $x \leq 1,2$ та при збільшенні параметра x ($x \geq 4,8$) внаслідок зростання частоти теплового ВТП. На основі комп'ютерного моделювання отримано результати сумісного вимірювального контролю діаметра d , питомого електричного опору ρ та температури t мідного зразка (в діапазоні температур від 20 до 160 °С). Крім того, були визначені термозалежні сигнали теплового ВТП зі зразком деталі обладнання, а також значення питомих нормованих величин, які пов'язують сигнали ВТП з фізико-механічними характеристиками зразків деталі обладнання, що контролюється.

4. Досліджено можливість застосування теорії роботи ВТП стосовно контролю електричних та температурних параметрів зразків стічних вод, які утворюються внаслідок виготовлення продукції пивоварної галузі. Отримано результати вимірювань нормованих сигналів вихорострумowego перетворювача та електричних та температурних параметрів зразка стічних вод.

Перспективи подальших досліджень полягають в створенні автоматизованих комп'ютерних систем контролю електричних та температурних характеристик напівфабрикатів продукції пивоваріння при реалізації нових інформативних методів на основі первинних теплових перетворювачів та підвищення якості готового продукту за рахунок впровадження додаткових режимів, які враховують температурні паузи в технологічному процесі.

Список літератури

1. ДСТУ ISO 14001:2015. Системи екологічного управління. (ISO 14001:2015, IDT). [Чинний від 2015-12-21]. Київ, 2016. 37 с. (Вимоги та настанови щодо застосування).
2. Масвський С.М., Серий К.М. Фізичні методи та засоби контролю середовищ, матеріалів та виробів. Львів. Видавництво Фізико-механічного інститута ім. Карпенка. 2011. 116 с.

3. Тетерко А.Я. Специфика формирования электромагнитного поля трещиной усталостного происхождения при вихретоковом контроле // Техническая диагностика и неразрушающий контроль. 2016. № 3. С. 38–43.
4. Тетерко А.Я. Метод формування інформаційного сигналу та підвищення точності вихрострумowego контролю питомої електричної провідності матеріалу із виключенням впливу зазору // Відбір і обробка інформації. 2016. Вип. 43 (119). С. 5–11.
5. Володарський Є.Т., Кошева Л.О., Литвиненко О.М. Ефективність послідовних алгоритмів контролю. Вісник Хмельницького Національного університету. Сер. Технічні науки. 2007. Т.2. С. 130–133.
6. Безотосный В.Ф. Применение вихретокового баланса для контроля свойств материалов накладными преобразователями // Вісн. Нац. техн. ун-та «ХПІ». Харків: НТУ «ХПІ». 2014. №48. С. 56-59.
7. Безотосный В.Ф. Выбор рациональной частоты тока намагничивания токовихревых преобразователей при контроле материалов // Електротехніка і Електромеханіка. 2012. №1. С.19 – 21.
8. Лисенко Ю.Ю. Імпульсний вихрострумовой контроль об'єктів циліндричної форми // Вісник НТУУ «КПІ». Серія приладобудування. Київ, 2013. Вип. 45. С. 69–75.
9. Тригуб І.І. Локалізація видовжених дефектів у випадку переміщення джерела первинного поля по поверхні металевого виробу // Відбір і обробка інформації. 2016. Вип. 43 (119). С. 21–25.
10. Ладанюк А.П., Архангельська К.С., Власенко Л.О. Теорія автоматичного керування технологічними об'єктами: навч. посіб. Київ: Національний університет харчових технологій, 2014. 274 с.
11. Порев В.А. Аналітичні екологічні прилади та системи: монографія / Порев В.А. та ін.; за ред. В.А. Порєва. Вінниця: УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2009. 336 с.
12. Кісіль І.С., Боднар Р.Т., Кісіль Р.І. Контроль якості розчинів поверхнево-активних речовин для різних технологічних процесів нафто газовидобутку // Розвідка та розробка нафтових і газових родовищ. 2007. № 3(24) ІФНТУНГ, 76019, Івано-Франківськ. С. 70–72.
13. Себко В.В., Здоренко В.Г. Метод неруйнівного контролю зразка водного розчину адипінової кислоти. Вісник Київського національного університету технологій та дизайну. 2016. №1. (94). С. 121–127.
14. Сидоренко Ю.В. Параметрична інтерполяційна функція Гауса. Комп'ютерне моделювання в хімії і технологіях та системах сталого розвитку: зб. матеріалів IV Міжнародної науково-практичної конференції. Київ: НТУУ «КПІ». 2014. С. 67–73.
15. Вашкурак У.Ю. Використання кавітаційних технологій для очищення стічних вод пивоварні // Вісник НУ «Львівська політехніка». Хімія, технологія речовин та їх застосування. 2017. № 868. С. 267–273.
16. Ковальчук В.А., Ковальчук О.В., Самелок В.І. Біотехнологія очистки стічних вод підприємств харчової промисловості // Коммунальное хозяйство городов: науч.-техн. сб. Київ: Техніка, 2010. Вип. 93. С. 182–187.

References (transliterated)

1. DSTU ISO 14001:2015. Systemy ekolohichnoho upravlinnia. (ISO 14001:2015, IDT). [Chynnyi vid 2015-12-21]. Kyiv, 2016. 37 s. (Vymohy ta nastanovy shchodo zastosuvannia).
2. Maievskiy S.M., Sieryi K.M. Fizychni metody ta zasoby kontroliu sere dovysch, materialiv ta vyrobiv. Lviv. Vydavnytstvo Fizyko-mekhanichnoho instytutu im. Karpenka. 2011. 116 s.

3. Teterko A.Ya. Speczifika formirovaniya elektromagnitnogo polya treshhinoj ustalostnogo proiskhozheniya pri vikhretokovom kontrole // Tekhnicheskaya diagnostika i nerazrushayushij kontrol. 2016. № 3. S. 38–43.
4. Teterko A.Ia. Metod formuvannya informatsiinoho syhnalu ta pidvyshchennia tochnosti vykhrostrumovoho kontroliu pytomoj elektrychnoi providnosti materialu iz vykliuchenniam vplyvu zazoru // Vidbir i obrobka informatsii. 2016. Vyp. 43 (119). S. 5–11.
5. Volodarskyi Ye.T., Kosheva L.O., Lytvynenko O.M. Efektyvnist poslidovnykh alhorytmiv kontroliu. Visnyk Khmelnytskoho Natsionalnogo universytetu. Ser. Tekhnichni nauky. 2007. T.2. S. 130–133.
6. Bezotosnyj V.F. Primenenie vikhretokovogo balansa dlya kontrolya svoystv materialov nakladny`mi preobrazovatelyami // Visn. Nats. tekhn. un-ta «KhPI». Kharkiv: NTU «KhPI». 2014. №48. S. 56-59.
7. Bezotosnyj V.F. Vy`bor racional`noj chastoty` toka namagnichivaniya tokovikhrevy`kh preobrazovatelej pri kontrole materialov // Elektrotehnika i Elektromekhanika. 2012. №1. S.19–21.
8. Lysenko Yu.Iu. Impulsnyi vykhrostrumovyi kontrol obiektiv tsylindrychnoi formy // Visnyk NTUU «KPI». Seriya prykladobuduvannya. Kyiv, 2013. Vyp. 45. S. 69–75.
9. Tryhub I.I. Lokalizatsiia vydovzhenykh defektiv u vypadku peremishchennia dzhherela pervynnogo polia po poverkni metalevoho vyrobu // Vidbir i obrobka informatsii. 2016. Vyp. 43 (119). S. 21–25.
10. Ladaniuk A.P., Arkhanhelska K.S., Vlasenko L.O. Teoriia avtomatynoho keruvannya tekhnolohichnymy obiektamy: navch posib. Kyiv: Natsionalnyi universytet kharchovykh tekhnolohii, 2014. 274 s.
11. Poriev V.A. Analitychni ekolohichni pryklady ta systemy: monohrafiia / Poriev V.A. ta in.; za red. V.A. Porieva. Vinnytsia: UNIVERSUM-Vinnytsia, 2009. 336 s.
12. Kasil I.S., Bodnar R.T., Kasil R.I. Kontrol yakosti rozchyniv poverkhevo-aktyvnykh rehovyn dlia riznykh tekhnolohichnykh protsesiv nafto hazovydobutku // Rozvidka ta rozrobka naftovykh i hazovykh rodovyshch. 2007. № 3(24) IFNTUNH, 76019, Ivano-Frankivsk. S. 70–72.
13. Sebko V.V., Zdorenko V.H. Metod neruivnogo kontroliu zrazka vodnogo rozchynu adypinovoї kysloty. Visnyk Kyivskoho natsionalnogo universytetu tekhnolohii ta dyzainu. 2016. №1. (94). S. 121–127.
14. Sydorenko Yu.V. Parametrychna interpolatsiina funktsiia Hausa. Kompiuterne modeliuvannya v khimii i tekhnolohiiakh ta systemakh staloho rozvytku: zb. materialiv IV Mizhnarodnoi naukovopraktychnoi konferentsii. Kyiv: NTUU «KPI». 2014. S. 67–73.
15. Vashkurak U.Iu. Vykorystannia kavitatsiinykh tekhnolohii dlia ochyshchennia stichnykh vod pyvovarni // Visnyk NU «Lvivska politehnika». Khimii, tekhnolohiia rehovyn ta yikh zastosuvannya. 2017. № 868. S. 267–273.
16. Kovalchuk V.A., Kovalchuk O.V., Sameliuk V.I. Biotekhnolohiia ochystky stichnykh vod pidpriemstv kharchovoi promyslovosti // Kommunalnoe khoziaistvo horodov: nauch.-tekhn. sb. Kyiv: Tekhnika, 2010. Vyp. 93. S. 182–187.

Надійшло (received) 26.09.2020

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Себко Вадим Вадимович (Себко Вадим Вадимович, Sebko Vadim) – доктор технічних наук, професор Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», професор кафедри «Хімічна техніка та промислова екологія»; м. Харків, Україна; ORCID: 0000-0002-3561-6281; E-mail: vadim.sebko@gmail.com.

Пироженко Євгенія Володимирівна (Пироженко Евгения Владимировна, PyrozhenkoYevgeny) – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», аспірант; м. Харків, Україна; Email: andreyperik@gmail.com.

Здоренко Валерій Георгійович (Здоренко Валерий георгиевич, Zdorenko Valeriy) – доктор технічних наук, професор Київський національний університет технологій та дизайну, завідувач кафедри «Комп'ютерно-інтегровані технології та вимірювальна техніка»; м. Київ, Україна; ORCID: 0000-0001-6508-4290; E-mail: alzd123@meta.ua.

Новожилова Тетяна Борисівна (Новожилова Татьяна Борисовна, Novozhilova Tatiana) – Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри «Хімічна техніка та промислова екологія»; м. Харків, Україна; ORCID: 0000-0003-2551-6954; E-mail: brina.tanya2@gmail.com.

Нечипоренко Дмитро Ігорович (Нечипоренко Дмитрий Игоревич, Nechiporenko Dmytro) – кандидат технічних наук, доцент Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри «Хімічна техніка та промислова екологія»; м. Харків, Україна; ORCID: 0000-0002-5570-1061; E-mail: nechiporenkodi@gmail.com.