

УДК 620.179.14

# ПОБУДОВА АВТОМАТИЗОВАНИХ ПРИСТРОЇВ БЕЗКОНТАКТНОГО КОНТРОЛЮ ДІАМЕТРА КАЛІБРОВАНИХ НЕМАГНІТНИХ ПРУТКІВ

**М. Сіренко**, кандидат технічних наук, професор кафедри приладів і методів неруйнівного контролю,  
**Б. Горкунов**, доктор технічних наук, професор кафедри інформаційно-вимірвальних технологій та систем,  
**С. Львов**, кандидат технічних наук, доцент кафедри,  
**Аббасі Жаббар**, аспірант,  
 Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»

*Розглянуто теоретичні аспекти методу та побудови алгоритму функціонування автоматизованих пристроїв безконтактного контролю діаметра каліброваних немагнітних прутків. Розроблено методуку та проведено розрахунки основних параметрів сигналів вихорострумове трансформаторного перетворювача з контрольованими прутками заданого діапазону зміни їх діаметрів. Запропоновано функціональні схеми автоматизованих пристроїв для розбракування прутків. Застосування розробленого пристрою контролю з диференційним вихорострумівим трансформаторним перетворювачем дозволяє підвищити точність контролю.*

*Production of billets and long products in the modern steel production facilities requires continuous monitoring of the organization of quality products. The main controllable parameters in this case are the geometrical dimensions of products. Important requirement for such control are non-contact measurement,*

*their automation, the ability of measurements of parameters of moving products on a given number of sections along its length in real time. Accordingly, the essential requirements for sensors and control devices are presented, such as high sensitivity to the measured parameter, specified the level of measurement accuracy, high reliability, protection from the effects of external factors on the measurement results, the presence of alarm devices for defective products. Eddy current transformer converters for quality control of long products meet the above requirements. The actual problem of monitoring the quality of calibrated non-magnetic stainless steel rods in terms of production is the development of automatic devices for contactless measurement of their diameter. As a result of the research the algorithm of work and functional circuit of automated devices, which are designed for contactless electromagnetic control of diameter of standard nonmagnetic rods and sorting developed. The methodology for calculating the expected signal converter with controlled rods predetermined diameter range offered.*

**Ключові слова:** вихорострумівий трансформаторний перетворювач, екстремум функції перетворення, калібрований немагнітний прутко, автоматизований пристрій безконтактного контролю.

**Keywords:** eddy current transformer converter, extremum of conversion function, a non-magnetic calibrated rod, automated device for contactless control.

**В**иробництво заготовки і сортового прокату на сучасних металургійних підприємствах потребує організації безперервного контролю якості продукції. Основні контрольовані параметри при цьому — геометричні розміри виробів [1]. Важливими вимогами для такого контролю є безконтактність вимірювань, їх автоматизація, можливість вимірювань параметрів рухомого виробу на заданій кількості ділянок уздовж його довжини у реальному вимірі часу. Відповідно, до датчиків та пристроїв контролю також пред'являються суттєві вимоги, такі як висока чутливість до вимірюваного параметра, заданий рівень точності вимірювань, висока надійність, захист від впливу зовнішніх факторів на результати вимірювань, наявність пристроїв сигналізації щодо

бракованої продукції. Таким вимогам за контролю якості сортового прокату насамперед відповідають вихороструміві трансформаторні перетворювачі (ВТП) [1—5].

Актуальною задачею поточного контролю якості каліброваних прутків з немагнітних конструкційних нержавіючих сталей за умов виробництва є розроблення автоматичних пристроїв для безконтактних вимірювань їх діаметра  $d$ . Цей геометричний параметр виробу не повинен перевищувати граничних відхилень межі його розміру  $\Delta d$  (з урахуванням знаку) згідно з вимогами відповідного стандарту [6]. Тому ця межа розміру одночасно є й межею між стандартним і бракованим виробом, тобто критерієм для розбракування.

Як теоретично показано у роботах [7, 8], це завдання можна вирішити за умови здійснення електромагнітного контролю прутків із застосуванням ВТП прохідного типу. В роботі [8] запропоновано спосіб одночасного контролю діаметра та електропровідності немагнітних прутків на основі пошуку екстремуму функції перетворення ВТП з об'єктом контролю. Тому далі необхідно розробити пристрої для автоматизації промислового контролю якості таких виробів.

*Мета статті* — розроблення алгоритму роботи та функціональних схем автоматизованих вимірювальних пристроїв, призначених для безконтактного електромагнітного контролю діаметра стандартних каліброваних прутків із немагнітних металів та їх розбракування.

### ОСНОВНА ЧАСТИНА

Результати досліджень [8] дозволяють реалізувати контроль якості каліброваних немагнітних прутків із застосуванням ВТП, оскільки значення його вихідного сигналу залежить від діаметра прутка, електропровідності та частоти збудження ВТП. Отже контроль може бути реалізований безпосередньо за граничними відхиленнями значень вихідного сигналу ВТП за умови, що електропровідність  $\sigma$  матеріалу прутків є незмінною (щонайменше для однієї плавки металу) і відповідає заданому стандарту значенню за визначеної температури (зазвичай за 20 °C після охолодження заготовки чи сортового прокату). Тому спочатку розглянемо теоретичні аспекти вихорострумовевого способу контролю, які обумовлюють принцип дії відповідних вимірювальних пристроїв.

### АЛГОРИТМ РОБОТИ ПРИСТРОЮ

В алгоритмі роботи пристрою можна виділити 3 етапи: встановлення робочого режиму ВТП з об'єктом контролю, вимірювання його сигналів і прийняття рішення (розбракування виробів).

Установлення робочого режиму ВТП передбачає збудження електромагнітного поля із заданим значенням його напруженості  $H$  і частоти  $f_0$ .

Попереднє визначення і подальше встановлення цієї частоти пов'язано з пошуком екстремуму функції перетворення ВТП з немагнітним прутком. У статті [8] показано, що екстремуму цієї функції відповідає лише одне значення узагальненого параметра  $x_0 = 1,6175$  незалежно від діаметра  $d$  прутка та електропровідності  $\sigma$  його матеріалу. З іншого боку, екстремум цієї функції досягається також за одного значення частоти  $f_0$  електромагнітного

поля ВТП з прутком [8]. За заданих стандартом [1] значень діаметра  $d$  та питомої електропровідності  $\sigma$  каліброваного прутка можна розрахувати значення частоти  $f_0$ , яка відповідає екстремуму функції перетворення ВТП з немагнітним прутком за значення узагальненого параметра  $x_0 = 1,6175$  за формулою [8]:

$$f_0 = 2x_0^2 / \pi d^2 \mu_0 \sigma, \quad (1)$$

де  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  (Гн/м) — магнітна константа.

Максимальне значення напруженості  $H$  електромагнітного поля ВТП залежить від максимального значення сили струму  $I_n$  у намагнічувальній (первинній) обмотці ВТП і обчислюється як

$$H = I_n W_n / l_n, \quad (2)$$

де  $W_n$  — число витків намагнічувальної обмотки ВТП;  $l_n$  — довжина намагнічувальної обмотки ВТП.

Якщо значення напруженості  $H$  задано, то для ВТП з конкретними значеннями параметрів його намагнічувальної обмотки ( $W_n$  та  $l_n$ ) розрахувати максимальне значення намагнічувального струму  $I_n$  можна за формулою:

$$I_n = H l_n / W_n. \quad (3)$$

На етапі вимірювання пристрій повинен здійснити вимірювання сигналів ВТП. Потрібно врахувати, що значення напруженості  $H$  поля ВТП впливає на рівень його вихідного сигналу, яким є електро-рушійна сила (ЕРС)  $E$  на затискачах вимірювальної (вторинної) обмотки ВТП. Для порожнього ВТП (без виробу) значення цієї ЕРС складає [1—5]:

$$E_0 = 1,11 f_0 W_b \pi d_b^2 \mu_0 H, \quad (4)$$

де  $W_b$  — число витків вимірювальної обмотки ВТП;  $d_b$  — діаметр вимірювальної обмотки ВТП.

Очікуване значення ЕРС  $E$  для цього ж датчика з контрольованим прутком можна визначити із рівняння

$$E = E_0 N d^2 / d_b^2, \quad (5)$$

де  $N$  — питомий, нормований, внесений виробом магнітний потік у ВТП, причому, як відомо з роботи [8], для значення узагальненого параметра  $x_0 = 1,6175$ , значення параметра  $N = 0,2983556$ .

Для здійснення операцій розбракування за величиною зовнішнього діаметра контрольованих виробів потрібно попередньо визначити очікувані значення сигналів ВТП з дослідним прутком, діаметр якого має максимально допустиме стандартом [1] значення граничного відхилення межі цього розміру  $\Delta d$ . У цьому випадку значення діаметра виробу складає ( $d + \Delta d$ , з урахуванням знаку), а значення питомої електропровідності залишається незмінним. Параметри електромагнітного поля ВТП ( $H$  і  $f_0$ ) та сигнал порожнього ВТП ( $E_0$ ) залишаються незмінними під час контролю. Оскільки змінилося значення

діаметра контрольованого прутка, то і відбулася зміна значення параметра  $x_0$  на значення  $x_i$ , яке розраховується тепер за формулою

$$x_i = ((d + \Delta d) / 2) \sqrt{2\pi\mu_0\sigma f_0}. \quad (6)$$

Після цього, скориставшись даними довідника [9] або відповідним програмним забезпеченням, можна визначити і нове значення питомого магнітного потоку  $N_i$ .

Тоді для обраного граничного значення діаметра  $(d + \Delta d)$  контрольованого виробу і визначеного параметра  $N_i$  можна розрахувати очікуване значення ЕРС  $E$  датчика з таким прутком:

$$E = E_0 N_i (d + \Delta d)^2 / d_0^2. \quad (7)$$

Отже, оскільки відомий із нормативних документів, допустимий діапазон зміни значень діаметрів  $(d + \Delta d)$  прутків за незмінного значення електропровідності  $\sigma$ , то можна визначити діапазон зміни сигналу (ЕРС  $E$ ) цього датчика.

#### ФУНКЦІОНАЛЬНА СХЕМА АВТОМАТИЗОВАНОГО ПРИСТРОЮ

Для побудови автоматизованого пристрою на основі ВТП, який реалізує зазначений спосіб контролю, потрібні генератор синусоїдальних сигналів, калібратори змінних напруг, компаратор напруги, пристрої реєстрації вимірювальної інформації та сигналізації стосовно бракованої продукції. На рис. 1 наведено функціональну схему автоматизованого пристрою.

За визначеного номінального значення діаметра  $d$  контрольованого каліброваного прутка за наведеним вище алгоритмом попередньо потрібно розрахувати значення частоти  $f_0$  та сили намагнічувального струму  $I_H$ , а потім гранично допустимі значення ЕРС — мінімальне ( $E_{\min}$ ) і максимальне ( $E_{\max}$ ) її значення.

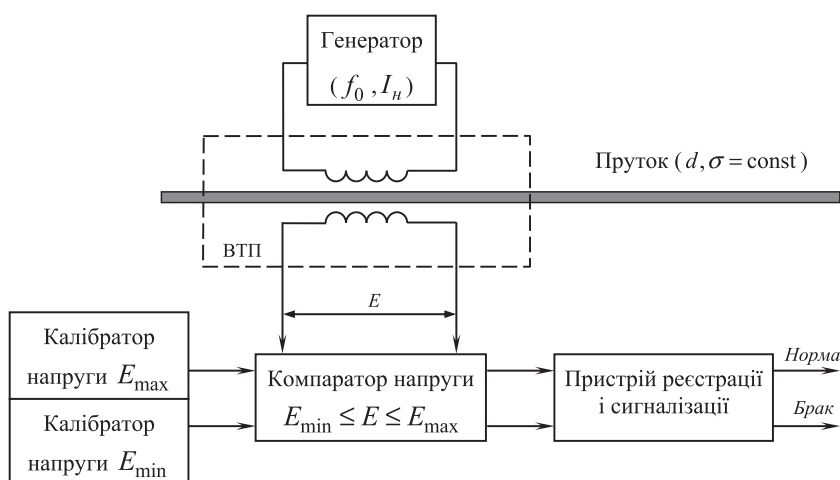


Рис. 1. Функціональна схема автоматизованого пристрою контролю діаметра каліброваних прутків

Fig. 1. Functional scheme of automated devices to control the diameter of the calibrated rod

Генератор повинен підтримувати вибране значення  $I_H$  струму синусоїдальної форми однієї частоти  $f_0$ , який протікає за витками первинної (намагнічувальної) обмотки ВТП та створює у його порожнині змінне електромагнітне поле напруженості  $H$  з частотою  $f_0$ . За проходження всередині порожнини ВТП каліброваного прутка на затискачах його вторинної (вимірювальної) обмотки з'являється напруга  $E$  (рис. 1), яка подається на перший вхід компаратора напруги. На другий його вхід подаються калібровані напруги мінімально допустимого ( $E_{\min}$ ) та максимального допустимого ( $E_{\max}$ ) значень, які задаються за допомогою калібраторів цих напруг. Результат порівняння цих сигналів ( $E_{\min} \leq E \leq E_{\max}$ ) фіксується пристроєм реєстрації та сигналізації у виді, який є зручним для оператора та для подальшого управління пристроєм розбракування прутків. Цей пристрій також може виробляти звукові та світлові сигнали стосовно наявності бракованої продукції, яка не відповідає вимогам стандарту за допустимими граничними відхиленнями значень діаметра каліброваних прутків.

Важливою особливістю такого пристрою є можливість контролю розміру діаметра немагнітних каліброваних прутків у процесі їх руху, причому на кожній ділянці прутка. Тобто у такий спосіб здійснюється 100 % контроль якості за цим параметром. Для проведення динамічних вимірювань швидкодія автоматизованого пристрою повинна перевищувати швидкість протягування прутка через ВТП.

Для підвищення чутливості й точності вимірювань потрібно застосувати метод порівняння, зокрема, один із його різновидів — диференційний метод вимірювань.

#### ДИФЕРЕНЦІЙНИЙ МЕТОД КОНТРОЛЮ ДІАМЕТРА ПРУТКІВ

Суть диференційного методу вимірювань полягає у тому, що це метод вимірювань, в якому невелика різниця між вимірюваною величиною і вихідною величиною міри вимірюється відповідним приладом [10].

Тому для підвищення чутливості й точності вимірювань діаметра прутків застосовується диференційна схема на основі використання двох ідентичних ВТП і з'єднання їх вторинних обмоток послідовно-зв'язано

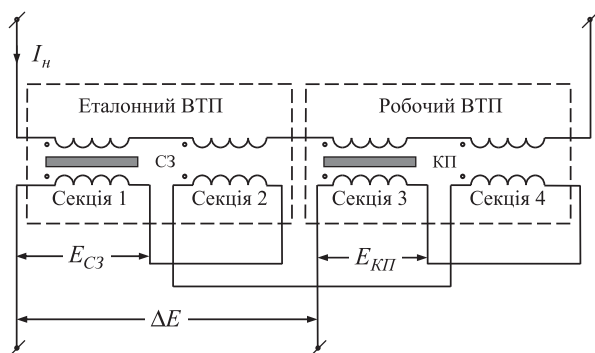


Рис. 2. Схема з'єднання обмоток еталонного і робочого перетворювачів  
 Fig. 2. Scheme of the connection coils of the working and exemplary converters

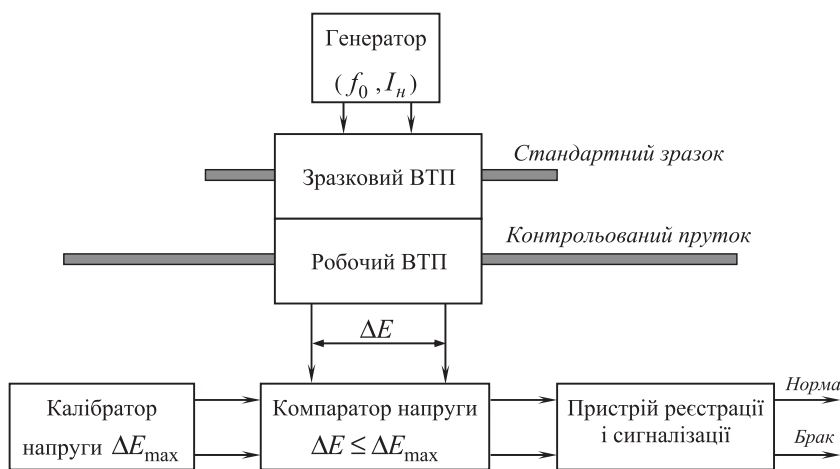


Рис. 3. Функціональна схема автоматизованого пристрою контролю з диференціальним перетворювачем  
 Fig. 3. Functional scheme the automated control device with a differential converter

(рис. 2). Початок кожної секції обмоток має позначку «О».

ВТП використовується як міра і є еталонним, оскільки в порожнині його секції 1 міститься стандартний зразок (СЗ) каліброваного прутка з номінальним розміром діаметра  $d$ . На затискачах його вимірювальної обмотки наводиться ЕРС  $E_{C3}$ :

$$E_{C3} = E_0 N d_{C3}^2 / d_b^2, \quad (8)$$

де  $E_0$  — ЕРС на затискачах секції 2 вимірювальної обмотки зразкового ВТП за заданої частоти  $f_0$  та напруженості  $H$  поля;  $N$  — нормований параметр, який відповідає [8] значенню узагальненого параметра  $x = 1,6175$  за екстремуму функції перетворення ВТП і дорівнює 0,29835563;  $d_{C3}$  і  $d_b$  — діаметри стандартного зразка та вимірювальної обмотки еталонного ВТП відповідно.

Другий ВТП — повністю аналогічний першому і вважається робочим, оскільки через порожнину його робочої секції 3 протягується контрольований пруток (КП) з діаметром  $d_{KP}$ . На виході цього датчика наводиться ЕРС  $E_{KP}$ :

$$E_{KP} = E_0 N_x d_{KP}^2 / d_b^2, \quad (9)$$

де  $E_0$  — ЕРС на затискачах секції 4 вимірювальної обмотки робочого ВТП за заданої частоти  $f_0$  та напруженості  $H$  поля;  $N_x$  — нормований параметр, який відповідає значенню узагальненого параметра  $x$ , розрахованого за формулою (6) за відомого значення відхилення стандартного значення діаметра  $d$  прутка на поточний розмір  $\Delta d$ ;  $d_{KP}$  і  $d_b$  — діаметри контрольованого прутка та вимірювальної обмотки робочого ВТП відповідно.

Вимірювальні обмотки обох ВТП з'єднані між собою послідовно-зустрічно, тому на кінцевих затискачах такого диференційного датчика створюється

ЕРС  $\Delta E$ , яка дорівнює

$$\Delta E = E_{C3} - E_{KP}. \quad (10)$$

У разі, якщо стандартний та контрольований прутки мають однакові розміри діаметра, диференційний сигнал  $\Delta E$  дорівнюватиме нулю.

Оскільки діаметр контрольованого прутка  $d_{KP}$  може відрізнятися від діаметра стандартного зразка  $d_{C3}$  на поточний розмір  $\Delta d$  (з урахуванням знаку), його можна розраховувати, як

$$d_{KP} = d_{C3} - \Delta d. \quad (11)$$

Максимальне значення ЕРС  $\Delta E_{max}$  визначається граничним відхиленням значення розміру

діаметра  $\Delta d$ , яке встановлено відповідним стандартом. Тоді, з урахуванням співвідношень (8) — (11), це значення можна обчислювати за формулою

$$\begin{aligned} \Delta E_{max} &= E_0 / d_b^2 (N d_{C3}^2 - N_x d_{KP}^2) = \\ &= E_0 / d_b^2 (N d_{C3}^2 - N_x (d_{C3} + \Delta d)^2). \end{aligned} \quad (12)$$

Розрахунок максимального значення ЕРС  $\Delta E_{max}$  потрібний для визначення еталонного сигналу калібрувальника напруги, який разом із сигналом  $\Delta E_{max}$  диференційного ВТП подається на компаратор напруги (рис. 3). У разі перевищення сигналом ВТП  $\Delta E$  максимального значення  $\Delta E_{max}$  спрацьовує сигналізація стосовно бракованої продукції.


### ВИСНОВКИ

У результаті проведених досліджень розроблено алгоритм роботи та функціональні схеми автоматизованих пристроїв, призначених для безконтактного електромагнітного контролю діаметра стандартних каліброваних прутків з немагнітних металів та їх розбракування. Запропоновано

методику розрахунку очікуваних сигналів ВТП з контрольованими прутками заданого діапазону зміни їх діаметрів. Застосування автомати-

зованого пристрою контролю з диференційним ВТП дозволяє підвищити чутливість і точність контролю.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ / REFERENCES

1. Неразрушающий контроль: Справочник. Т.2 / Под общ. ред. В.В. Ключева. — Москва: Машиностроение (Nondestructive testing: Directory. Vol.2 / Ed. V.V. Klyuev. — Moskva: Mashinostroenie), 2003. — 688 с/р.
2. Неразрушающий контроль. В 5 кн. Кн. 3. Электромагнитный контроль: Практическое пособие / Под ред. В. В. Сухорукова. — Москва: Высшая школа (Nondestructive testing. Vol. 3. Electromagnetic Testing: A Practical Guide / Ed. V. V. Suhorukov. — Moskva: Vysshaya shkola), 1992. — 312 с/р.
3. Неразрушающий контроль металлов и изделий. Справочник / Под ред. Г.С. Самойловича. — Москва: Машиностроение (Non-destructive testing of metals and products. Directory / Ed. G.S.Samoylovich — Moskva: Mashinostroenie), 1976. — 456 с/р.
4. Неразрушающий контроль качества изделий электромагнитными методами / Герасимов В.Г., Останин Ю.Я., Покровский А.Д. [и др.] — Москва: Энергия (Non-destructive control of quality of products by electromagnetic methods / Gerasimov V.G., Ostanin Y.Y., Pokrovskiy A.D. [and others] — Moskva: Energiya), 1978. — 216 с/р.
5. Себко В.П. Исследование электромагнитного проходного преобразователя с цилиндрическим изделием / В.П. Себко, С.Б. Голоцван, В.М. Горкунов // Приборостроение. Известия ВУЗов (Sebko V.P. Research the electromagnetic transducer with cylindrical product / V.P. Sebko, S.B. Golotsvan, V.M. Gorkunov // Priborostroenie. Izvestiya VUZov) — 1988. — № 7. — С/Р. 53—59.
6. ГОСТ 7417-75. Сталь калиброванная круглая. Сортамент. — Москва: Стандартинформ (Standart USSR 7417-75. Calibrated round steel. Assortament. — Moskva: Standartinform), 2012. — 5 с/р.
7. Оптимизация работы электромагнитного преобразователя по частоте возбуждающего поля / Горкунов Б.М., Авраменко А.А., Львов С.Г. и др. // Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит (Optimization of the electromagnetic transducer frequency power supply field / Gorkunov B.M., Avramenko A.A., Lvov S.G. [and others] // Energoberezhnie. Energetika. Energoaudit). — 2014. — Т. 2, — № 9 — (128). — С/Р. 120—124.
8. Сіренко М.М. Функція перетворення вихорострумового перетворювача з немагнітними виробами / М.М. Сіренко, Б.М. Горкунов, С.Г. Львов // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Автоматика та приладобудування. — Харків: НТУ «ХПІ» (Sirenko M.M. Conversion function of eddy current transducer with nonmagnetic products / M.M. Sirenko, B.M. Gorkunov, S.G. Lvov // Visnik NTU «KhPI». Seriya: Avtomatika ta priladobuduvannya. — Kharkiv: NTU "KhPI"), — 2016. — № 15 (1187). — С/Р. 45—48.
9. Справочник со специальными функциями с формулами, графиками и таблицами / Под ред. М. Абрамовиц и И. Стиган. — Москва: Наука (Directory of special functions with formulas, graphs and tables / Ed. M. Abramovits, I. Stigan. — Moskva: Nauka), 1979. — 832 с/р.
10. Основы метрологии и электрические измерения / Под ред. Душина Е.М. Ленинград: Энергоатомиздат (Fundamentals of metrology and electrical measurements / Ed. Dushin E.M. Leningrad: Energoatomizdat), — 1987. — 480 с/р. 

Отримано / received: 22.02.2017.

Стаття рекомендована до публікації д.т.н., проф. Ю.Ф. Павленком (Україна).  
Prof. Yu.F. Pavlenko, D. Sc. (Tech.), Ukraine, recommended this article to be published.