

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ, МОЛОДІ ТА СПОРТУ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
"ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ"**

**Тищенко Анна Анатоліївна**

УДК 620.179.14

**ЕЛЕКТРОМАГНІТНИЙ МЕТОД ТА ПРИСТРІЙ ДЛЯ КОНТРОЛЮ  
ГЛИБИНИ МЕХАНІЧНОГО ЗМІЦНЕННЯ МЕТАЛЕВИХ  
ЦИЛІНДРИЧНИХ ВИРОБІВ**

**Спеціальність 05.11.13 – прилади і методи контролю  
та визначення складу речовин**

**Автореферат  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук**

**Харків – 2013**

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі приладів і методів неруйнівного контролю Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут" Міністерства освіти і науки, молоді та спорту України.

Науковий керівник: доктор технічних наук, доцент  
Горкунов Борис Митрофанович,  
Національний технічний університет "Харківський  
політехнічний інститут", м. Харків, професор  
кафедри приладів і методів неруйнівного контролю

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор  
Сахацький Віталій Дмитрович,  
Українська інженерно-педагогічна академія,  
м. Харків, професор кафедри радіоелектроніки і  
комп'ютерних систем

кандидат технічних наук, доцент  
Половинка Дмитро Васильович,  
Східноукраїнський національний університет імені  
Володимира Даля, м. Луганськ,  
доцент кафедри електротехнічних систем  
електроспоживання

Захист відбудеться "25" 04 2013 р. о 14-30 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.050.09 в Національному технічному університеті "Харківський політехнічний інститут" за адресою: 61002, м. Харків, вул. Фрунзе, 21.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут".

Автореферат розісланий "21" 03 2013 р.

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради

Глоба С. М.

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Комплекс експлуатаційних характеристик і ресурс виробів реалізується на стадії виробництва, тому надзвичайно важливим є контроль якості готової продукції. Саме контроль глибини зміцнення на стадії виготовлення повинен бути першочерговим у реалізації комплексної програми діагностики об'єктів в процесі їх експлуатації, так як тільки в цьому випадку можна зафіксувати тенденцію зміни тих параметрів, від яких залежить залишковий ресурс.

Оскільки теорія вихорострумowego контролю параметрів виробів спирається на емпіричні закономірності, виникає обмеженість розрахункових моделей, внаслідок чого є певні недоліки оцінки співвідношень між електромагнітними і фізико-механічними параметрами об'єкта контролю. Слід звернути увагу на те, що питання визначення глибини зміцненого шару об'єкта контролю за допомогою спільного контролю двох електромагнітних параметрів: питомої електричної провідності і відносної магнітної проникності є перспективною задачею теорії неруйнівного контролю.

Сьогодні підвищення достовірності контролю базується на удосконаленні математичних підходів, які полягають у порівнянні вихідних сигналів перетворювача з контрольованим виробом із розрахованими згідно розробленої фізико-математичної моделі. Це дозволяє враховувати як похибки моделі, так і похибки вимірювання.

Таким чином, задача удосконалення безконтактного вихорострумowego методу і пристрою для контролю глибини зміцненого шару металевих циліндричних виробів, що дозволяє здійснювати контроль в режимі реального часу, враховуючи ризик замовника і ризик виробника, є актуальною і перспективною та склала напрям дисертаційної роботи.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дисертація виконувалася відповідно до тематики роботи кафедри приладів і методів неруйнівного контролю НТУ "ХП". Здобувач, як виконавець, брав участь у науково-дослідних держбюджетних роботах МОН України: "Дослідження можливості створення прототипів приладів неруйнівного контролю нового покоління з використанням енерго- та ресурсозберігаючих технологій" (ДР № 0111U002280) та "Розробка експериментального двигуна, з ротором що котиться для безредукторного електроприводу" (ДР № 0109U002394).

**Мета і задачі дослідження.** Метою дисертаційної роботи є розробка методу і пристрою контролю глибини зміцненого шару металевих циліндричних виробів.

Для досягнення цієї мети в роботі поставлені наступні задачі:

– розробити фізико-математичну модель вихорострумowego перетворювача з об'єктом контролю для визначення вихідних сигналів, які містять інформацію про глибину зміцненого шару;

– провести експериментальні дослідження для визначення вихідних сигналів перетворювача з імітаційним зразком і реальними зміцненими

зразками для підтвердження адекватності розробленої фізико-математичної моделі;

- розробити методи вихорострумowego контролю глибини зміцненого шару металевих циліндричних зразків;

- провести оцінку достовірності контролю глибини зміцненого шару металевих циліндричних виробів, що враховує ризики виробника і замовника;

- розробити макет вихорострумowego пристрою, що дозволяє проводити контроль в реальному масштабі часу.

*Об'єктом дослідження* є процес взаємодії електромагнітного поля з металевим циліндричним об'єктом контролю для одержання інформації про глибину зміцненого шару.

*Предметом дослідження* є метод та пристрій вихорострумowego контролю глибини зміцненого шару металевих виробів, заснований на порівнянні розрахункових і вимірюваних сигналів перетворювача.

**Методи дослідження.** Під час вирішення поставлених задач використані аналітичні методи розв'язання задач електродинаміки суцільних середовищ, чисельні методи лінійної алгебри, методи диференціального й інтегрального числення, елементи теорії ймовірності та математичної статистики. Перевірка адекватності розробленого методу контролю зміцненого шару здійснювалася шляхом експериментальних досліджень на макеті установки з використанням імітаційних і реальних циліндричних зразків, які пройшли процес зміцнення. Експериментальні дослідження проведені на базі лабораторії кафедри приладів і методів неруйнівного контролю НТУ "ХП".

**Наукова новизна отриманих результатів:**

- удосконалено методику розрахунку вихідних сигналів вихорострумowego перетворювача зі зміцненим об'єктом контролю;

- експериментально доведено адекватність розробленої фізико-математичної моделі вихорострумowego перетворювача з циліндричним об'єктом контролю;

- вперше розроблено безконтактний вихорострумовой метод для контролю глибини поверхневого зміцнення металевих циліндричних виробів, суть якого полягає в порівнянні вихідних сигналів перетворювача з об'єктом контролю з заздалегідь розрахованими вихідними сигналами для заданої глибини зміцнення або в порівнянні з вихідними сигналами вихорострумowego перетворювача зі стандартним зразком, глибина зміцненого шару якого відповідає заданому значенню, в реальному масштабі часу;

- вперше розроблений безконтактний вихорострумовой метод контролю глибини зміцненого шару металевих циліндричних виробів, який полягає у порівнянні попереднього і поточного вихідних сигналів перетворювача із зміцненим об'єктом контролю, виміряних через задані інтервали часу, і визначення розбіжності між ними.

**Практичне значення отриманих результатів** для приладобудування

полягає в запровадженні методик націлених на модернізацію та створення пристроїв неруйнівного контролю металевих циліндричних виробів.

- Розроблений лабораторний макет автоматизованої установки, що дозволяє проводити контроль глибини зміцненого шару циліндричних об'єктів шляхом визначення розбіжності між вихідними сигналами вихорострумowego перетворювача з об'єктом контролю та перетворювача зі стандартним зразком.

- Розроблено макет вихорострумowego пристрою для контролю поверхневого зміцнення металевих виробів, який дозволяє вирішити задачу підвищення достовірності контролю глибини зміцненого шару електропровідних матеріалів та виробів (Патент на корисну модель № 52844, (Україна)).

Основні результати роботи впроваджено:

- ПП "ДДП" (м. Миколаїв) – для безконтактного контролю глибини зміцненого шару металевих циліндричних виробів;

- результати роботи використовуються на кафедрі електричних машини НТУ "ХПІ" – при розробці високомоментного двигуна з термічно обробленими магнітопроводами статора та ротора;

- результати роботи використовуються в навчальному процесі на кафедрі приладів і методів неруйнівного контролю НТУ "ХПІ" – під час проведення лабораторних занять, підготовки бакалаврів, спеціалістів та магістрів.

**Особистий внесок здобувача.** Основні теоретичні і практичні результати дисертаційної роботи, які виносяться на захист, отримані здобувачем особисто. Серед них: проведено аналіз методів і пристроїв контролю глибини зміцненого шару металевих виробів. Розроблено теоретичні фізико-математичні моделі взаємодії вихорострумowego перетворювача з циліндричним об'єктом контролю, що має зміцнений поверхневий шар. Отримано основні вирази для розрахунку вихідних сигналів перетворювача, що дозволяють визначити глибину зміцненого шару металевого циліндричного виробу. Розроблено метод ідентифікації глибини зміцненого поверхневого шару з урахуванням похибок моделювання та вимірювання сигналу перетворювача. Проведено експериментальні дослідження на ідеалізованих моделях і реальних об'єктах, які підтверджують адекватність та коректність проведених в роботі досліджень. Для визначення достовірності результатів контролю глибини зміцненого шару металевих циліндричних виробів розроблена процедура прийняття рішень за параметрами досліджуваного зразка на основі багатовимірного статистичного аналізу результатів моделювання і експериментальних досліджень контрольованої величини.

**Апробація результатів дисертаційної роботи.** Основні наукові результати дисертаційної роботи доповідались та схвалені на: 7-й Міжнародній конференції "Неразрушающий контроль и техническая диагностика в промышленности" (Москва, Росія, 2008); Міжнародних науково-практичних конференціях "Інформаційні технології: наука, техніка,

технологія, освіта, здоров'я" (Харків, 2008, 2009); 8-й Міжнародній науково-технічній конференції "Проблеми інформатики і моделювання" (Харків, 2008); IX Міжнародній науково-технічній конференції "Приладобудування: стан і перспективи" (Київ, 2010); 15-ому ювілейному молодіжному форумі "Радиоэлектроника и молодежь в XXI веке" (Харків, 2011); 6-й Міжнародній науково-технічній конференції "Сучасні прилади, матеріали і технології для неруйнівного контролю і технічної діагностики машинобудівного і нафтогазопромислового обладнання" (Івано-Франківськ, 2012); наукових семінарах кафедри приладів і методів неруйнівного контролю НТУ "ХП".

**Публікації.** За темою дисертаційної роботи опубліковано 18 наукових праць, серед них: 10 публікацій у фахових наукових виданнях України, 1 патент України, 7 – у матеріалах конференцій.

**Структура й обсяг дисертації.** Дисертаційна робота складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків і додатків. Повний обсяг дисертації складає 163 сторінки, з них: 46 рисунків за текстом; 12 таблиць за текстом; 3 додатки на 19 сторінках; 152 найменування використаних науково-технічних джерел на 18 сторінках.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

**У вступі** обґрунтовано актуальність обраної теми дисертаційної роботи, сформульовано мету роботи та основні задачі дослідження, наведено зв'язок дисертаційної роботи з науковими програмами, планами, темами, визначено наукову новизну та практичне значення роботи, зазначено особистий внесок здобувача, вказано відомості про апробацію результатів досліджень і їх публікації.

**У першому розділі** проведено аналіз методів і пристроїв для контролю зміцненого шару металевих виробів. На підставі огляду науково-технічної літератури щодо застосування методів і приладів неруйнівного контролю зроблено висновок про доцільність використання вихорострумовевого методу для контролю зміцнених шарів металевих виробів завдяки таким перевагам як багатопараметровість, безконтактність, слабка залежність результатів контролю від впливу зовнішніх факторів. На основі узагальнення досліджень, які проводяться в галузі неруйнівного контролю, визначені основні невирішені завдання та обґрунтовано напрямки досліджень.

**У другому розділі** отримано аналітичні вирази для визначення вихідного сигналу вихорострумовевого перетворювача (ВСП) з об'єктом контролю (ОК), поверхня якого представляє собою зміцнений шар, який поміщено в однорідне електромагнітне поле. Для цього розроблена фізико-математична модель ВСП як параметричного, так і трансформаторного типів з ОК, яка представляє собою взаємодію елементарних електромагнітних полів обмоток перетворювача і індукованих вихрових струмів в циліндричному об'єкті. Для отримання основних виразів, які описують взаємодію ВСП і циліндричного зразка, що пройшов процес зміцнення, використовували той факт, що після процесу зміцнення на поверхні ОК

формується зміцнений шар, який можна представити у вигляді набору елементарних кілець з діаметром перетину, рівним глибині зміцненого шару.

На рис. 1 представлено ОК – циліндричний зразок, який пройшов процес зміцнення, внаслідок чого на поверхні сформувався зміцнений шар, глибина якого  $h$ , з відносною магнітною проникністю  $\mu_{r1}$  і питомої електричної провідністю  $\sigma_1$ , які відрізняються від початкових значень електромагнітних характеристик  $\mu_{r2}$  і  $\sigma_2$  матеріалу. Оскільки уздовж осі об'єкта величина напруженості магнітного поля  $H$  є величиною постійною, то справедливо представити циліндричний об'єкт у вигляді близько розташованих дисків кінцевих розмірів. Враховуючі те, що при намагнічуванні об'єкта спостерігається скін-ефект, справедливо представити диск у вигляді концентричного струмопроводу з товщиною, рівною еквівалентній глибині проникнення  $\delta$  електромагнітного поля у зразок чи інакше у вигляді кільця зображення вихрового струму в ОК.

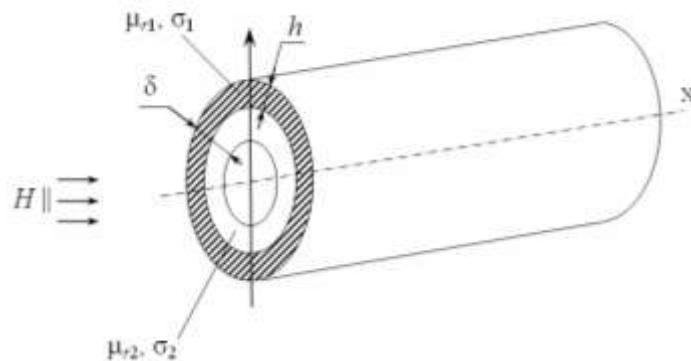


Рисунок 1 – Циліндричний зразок після процесу зміцнення

На рис. 2 представлено ВСП трансформаторного типу з числом витків вимірювальної та намагнічувальної обмотки  $W_B$  і  $W_H$  відповідно, з ОК, зміцнений шар якого представлено у вигляді двох шарів котушки з числом елементарних витків першого  $W_{k1}$  і другого шару  $W_{k2}$ . Обмотки перетворювача, а також ОК складаються з  $p$  шарів, в кожному з яких міститься  $n$  витків.

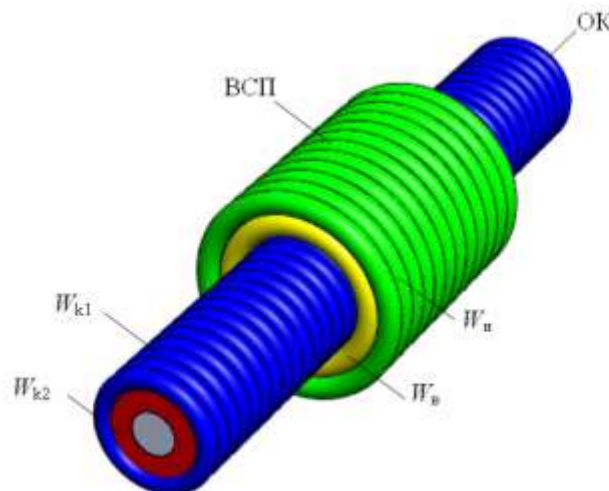


Рисунок 2 – Трансформаторний ВСП с циліндричним ОК

Для отримання аналітичних виразів, що описують взаємодію ВСП з ОК застосована спрощена фізико-математична модель трансформаторного ВСП з ОК, поверхня якого представляє собою двошарову котушку, яка показана на рис. 3 у вигляді системи з чотирьох витків. Дана модель включає: один виток намагнічувальної обмотки діаметром  $D_H$ , по якому протікає намагнічувальний струм  $I_H$ , викликаний електрорушійною силою (ЕРС) в контурі; виток вимірювальної обмотки діаметром  $D_B$ , який замкнений на вольтметр з внутрішнім опором  $R_v$ , в контурі якого протікає індукований струм  $I_B$ ; короткозамкнуті витки змодельованого першого шару ОК діаметром  $D_{k1}$  і другого шару ОК діаметром  $D_{k2}$ , по яких протікають вихрові струми  $I_{k1}$  і  $I_{k2}$  відповідно.

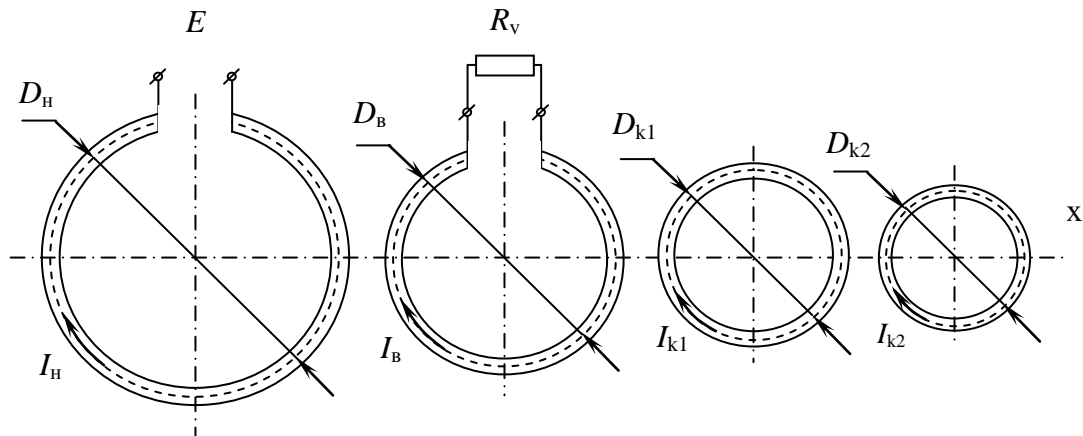


Рисунок 3 – Спрощена модель системи трансформаторний ВТП-ОК

Для запропонованої моделі трансформаторного ВТП-ОК отримана система лінійних алгебраїчних рівнянь у комплексному вигляді

$$\begin{cases} (R_H + j\omega L_H)\dot{I}_H + j\omega M_{HB}\dot{I}_B + j\omega M_{Hk1}\dot{I}_{k1} + j\omega M_{Hk2}\dot{I}_{k2} = \dot{E} \\ j\omega M_{BH}\dot{I}_H + (R_B + j\omega L_B + R_v)\dot{I}_B + j\omega M_{Bk1}\dot{I}_{k1} + j\omega M_{Bk2}\dot{I}_{k2} = 0 \\ j\omega M_{k1H}\dot{I}_H + j\omega M_{k1B}\dot{I}_B + (R_{k1} + j\omega L_{k1})\dot{I}_{k1} + j\omega M_{k1k2}\dot{I}_{k2} = 0 \\ j\omega M_{k2H}\dot{I}_H + j\omega M_{k2B}\dot{I}_B + j\omega M_{k2k1}\dot{I}_{k1} + (R_{k2} + j\omega L_{k2})\dot{I}_{k2} = 0 \end{cases}, \quad (1)$$

де  $R_H, R_B, R_{k1}, R_{k2}$  – активні опори витків намагнічувальної та вимірювальної обмоток ВСП і струмових вихрових витків першого і другого шару ОК відповідно;  $L_H, L_B, L_{k1}, L_{k2}$ , – власні індуктивності витків;  $M_{HB}, M_{Hk1}, M_{Hk2}, M_{BH}, M_{Bk1}, M_{Bk2}, M_{k1H}, M_{k1B}, M_{k1k2}, M_{k2H}, M_{k2B}, M_{k2k1}$  – взаємні індуктивності між відповідними витками системи ВСП - ОК.

Активні опори  $R_H, R_B, R_{k1}, R_{k2}$  знаходяться з загального виразу

$$R = \frac{4W}{\sigma\delta^2}(D - \delta), \quad (2)$$



де  $W$  – кількість витків відповідної обмотки;  $D$  – діаметр витка відповідної обмотки;  $\delta = \sqrt{2/\mu_0\mu_r\omega\sigma}$ , – глибина проникнення зондуючого поля в ОК,  $\mu_0$  – магнітна постійна,  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м,  $\omega = 2\pi f$ , – циклічна частота,  $f$  – частота зондуючого поля;

Значення власних індуктивностей ( $L_H$ ,  $L_B$ ,  $L_{k1}$ ,  $L_{k2}$ ) кругового кільця кругового перерізу для різних частот зондуючого поля з точністю до членів порядку  $(d/D)^2$  знаходяться з узагальненого виразу

$$L = \mu_0 \frac{D}{2} \left( \ln \frac{8D}{d} - 2 + \frac{\mu}{\mu_0} \cdot \frac{\zeta}{4} \right), \quad (3)$$

де  $\mu = \mu_0\mu_r$ , – абсолютна магнітна проникність речовини;  $d$  – діаметр поперечного перерізу витка;  $\zeta$  – величина, значення якої знаходять таким чином

$$\zeta = \frac{8}{kd} \cdot \frac{\text{ber}(kd/2) \text{ber}'(kd/2) + \text{bei}(kd/2) \text{bei}'(kd/2)}{(\text{ber}'(kd/2))^2 + (\text{bei}'(kd/2))^2}, \quad (4)$$

де  $\text{ber}(kd/2)$  и  $\text{bei}(kd/2)$  – дійсна і уявна складові функції Бесселя першого роду нульового порядку;  $\text{ber}'(kd/2)$  и  $\text{bei}'(kd/2)$  – їх похідні по  $kd/2$ .

Визначення взаємних індуктивностей між відповідними витками системи ВСП-ОК здійснено за допомогою методу еквівалентних кругових контурів: кожна котушка замінюється двома еквівалентними контурами. Для цього контури другого шару ОК позначили цифрами 1 і 2, першого – 3 і 4, вимірвальну котушку перетворювача – 5 і 6, намагнічувальну – 7 і 8. У загальному випадку взаємна індуктивність визначається за формулою

$$M = (W_{k2}W_{k1}W_BW_H/8)(M_{13} + M_{14} + M_{15} + M_{16} + M_{17} + M_{18} + M_{23} + M_{24} + M_{25} + M_{26} + M_{27} + M_{28} + M_{35} + M_{36} + M_{37} + M_{38} + M_{45} + M_{46} + M_{47} + M_{57} + M_{58} + M_{67} + M_{68}), \quad (5)$$

де  $M_{13}$  – взаємна індуктивність кругових контурів 1 та 3 і т.д.

Взаємні індуктивності відповідних коаксіальних кругових контурів, які входять у формулу (5), визначені за формулами:

1) для контурів однакових діаметрів з методичної похибкою розрахунку 0,2% вираз має вигляд

$$M = \mu_0 \frac{D}{2} \left[ \left( 1 + \frac{3}{4}\xi^2 \right) \ln \frac{4}{\xi} - \left( 2 - \frac{1}{4}\xi^2 \right) \right], \quad (6)$$

де  $\xi = b/D$ ,  $b$  – відстань між площинами, в яких розташовані контури.

2) для контурів різних діаметрів з методичної похибкою розрахунку 0,3% вираз має вигляд

$$M = \frac{\mu_0 \pi \sqrt{2D_1 D_2}}{2\sqrt{2}} m^3 \left[ \frac{1}{8} + \frac{3}{32} m^2 \right], \quad (7)$$

де  $m^2 = 4D_1 D_2 / ((D_1 + D_2)^2 + b^2)$ .

На практиці вихідними сигналами ВСП є сумарні і внесені ЕРС ( $E_\Sigma$  і  $E_{\text{вн}}$ ) та фаза ( $\varphi_\Sigma$  і  $\varphi_{\text{вн}}$ ) вимірювальної обмотки. При розв'язанні системи лінійних рівнянь (1) щодо комплексного значення струму у вимірювальній обмотці  $\dot{I}_{j\text{в}}$  отримано вирази для знаходження  $E_\Sigma$  і  $\varphi_\Sigma$ :

$$E_\Sigma = \sqrt{(\text{Re}(\sum_{j=1}^p (\dot{I}_{j\text{в}})) R_v)^2 + (\text{Im}(\sum_{j=1}^p (\dot{I}_{j\text{в}})) R_v)^2}; \quad (8)$$

$$\varphi_\Sigma = -\arctg(\text{Im} \sum_{j=1}^p (\dot{I}_{j\text{в}}) / \text{Re} \sum_{j=1}^p (\dot{I}_{j\text{в}})). \quad (9)$$

Вирази для визначення  $E_{\text{вн}}$  і  $\varphi_{\text{вн}}$  мають вигляд:

$$E_{\text{вн}} = \sqrt{E_\Sigma^2 + E_0^2 - 2E_\Sigma E_0 \cos \varphi_\Sigma}; \quad (10)$$

$$\varphi_{\text{вн}} = \arccos((E_{\text{вн}}^2 + E_0^2 - E_\Sigma^2) / 2E_{\text{вн}} E_0), \quad (11)$$

де  $E_0 = 1,11 f W_{\text{в}} \pi D_{\text{в}}^2 \mu_0 I_{\text{н}} W_{\text{н}} / l_{\text{н}}$  – ЕРС, яка зумовлена магнітним потоком в трансформаторному ВСП без ОК;  $l_{\text{н}}$  – довжина намагнічувальної обмотки ВСП.

Визначено вплив міжвиткових і міжшарових ємнісних зв'язків на результат контролю для різних матеріалів і розрахована резонансна частота перетворювача, що дозволило вибрати частотний діапазон роботи ВСП,  $f < 40$  кГц.

**Третій розділ** присвячений перевірці адекватності розробленої фізико-математичної моделі ВСП з ОК. Для цього проведені експериментальні дослідження, які дозволили оцінити поведінку вихідних характеристик ВСП при контролі зміцненого шару ОК для двох випадків: імітаційний зразок і зразки, що пройшли технологічний цикл зміцнення поверхневого шару.

Імітаційний ОК представлений у вигляді трубки, всередині якої розміщений суцільний циліндричний зразок (рис. 4). Трубка виконана із сталі 3 ( $\sigma = 0,5 \cdot 10^7$  См/м і  $\mu_r = 220$ ), зовнішній діаметр трубки становив  $D_3 = 20,6$  мм, внутрішній діаметр –  $D_{\text{в}} = 20,4$  мм, довжина  $l = 165$  мм. Суцільний циліндричний зразок виконаний з латуні ЛС-63 ( $\sigma = 0,9 \cdot 10^7$  См/м і  $\mu_r = 1$ ), діаметр  $d = 20$  мм, довжина  $l = 220$  мм. Імітаційний ОК дозволив провести моделювання зміцненого зразка, причому електромагнітні

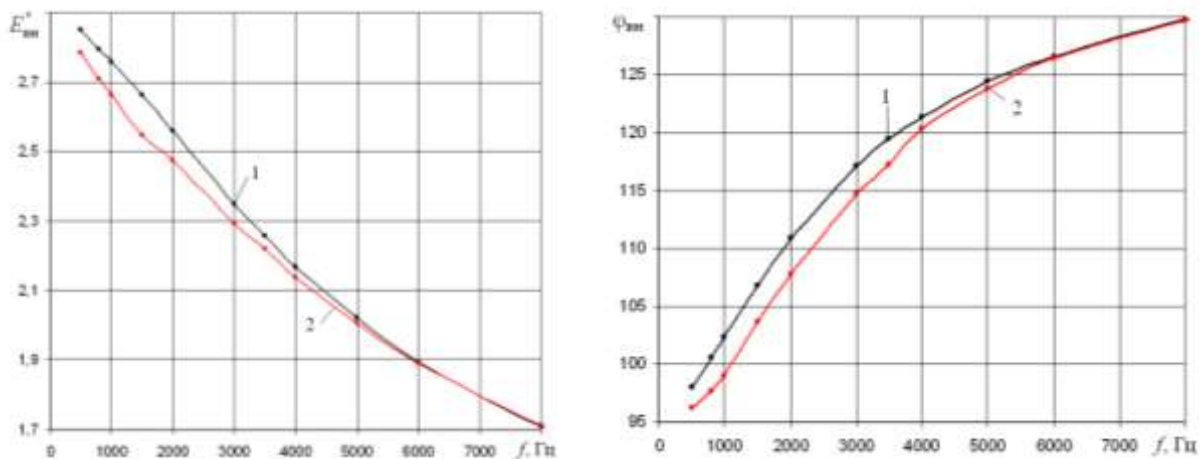
характеристики зміцненого шару (трубки) значно відрізнялися від електромагнітних характеристик "сирого" металу. Експерименти проводилися за допомогою трансформаторного електромагнітного перетворювача прохідного типу на різних частотах зонduючого поля ( $f = 500\text{Гц}-8\text{кГц}$ ) і при постійному струмі намагнічування  $I_H = 150\text{мА}$ .

суцільний зразок



Рисунок 4 – Зразки для проведення експериментальних досліджень

Результати поведінки залежностей нормованої внесеної ЕРС ( $E_{\text{вн}}^* = E_{\text{вн}} / E_0$ ) і фази ( $\varphi_{\text{вн}}$ ) вихідного сигналу ВСП з імітаційним ОК наведені на рис. 5.



1 – трубка; 2 – імітаційний ОК

Рисунок 5 – Графічні залежності амплітуди і фази вихідного сигналу ВСП від частоти зонduючого поля

Для визначення частоти переходу від "сирого" металу до зміцненого шару визначено розбіжність між вихідними сигналами ВСП з трубкою і ВСП з імітаційним ОК, яка при частоті зонduючого поля  $f = 6\text{кГц}$  склала  $\beta_{E_{\text{вн}}^*} = 0,19\%$  і  $\beta_{\varphi_{\text{вн}}} = 0,16\%$ . З виразу  $h = \sqrt{2/\mu_0\mu_r\omega\sigma}$  отримано значення глибини зміцненого шару –  $h = 0,196\text{ мм}$ .

Проведені експериментальні дослідження на реальних зразках, які представляли собою шестигранні прутки, середній діаметр яких дорівнює 14 мм, і виконані зі сталі марок Ст.45, 40Х і сталі 20. Загартуванню піддавалися зразки зі сталі марок Ст.45, 40Х, а сталь 20 перед загартуванням пройшла процедуру цементації в карбюризаторі на протязі 10 годин. Зразки гартувалися у воді при попередньому нагріві до  $850-870^\circ\text{C}$  з витримкою

30 хвилин. Для даних зразків отримані графічні залежності амплітуди і фази вихідного сигналу ВСП і визначена частота переходу від "сирого" металу до зміцненого шару.

Згідно з результатами розрахунку очікуваних значень вихідних сигналів ВСП з ОК середньоквадратичне відхилення вихідних сигналів ВСП з ОК близько за своїм значенням до абсолютної похибки моделювання, визначеної непрямим методом.

Для оцінки випадкових значень ЕРС і фази вихідного сигналу ВСП при контролі глибини зміцненого шару металевих циліндричних виробів проведені багаторазові випробування на імітаційному зразку. Як і у випадку розрахунку очікуваних значень вихідних сигналів ВСП з ОК, для перевірки можливості використання нормального закону розподілу випадкових помилок, застосовано критерій Пірсона. Значення  $\chi^2$  для  $E_{\text{вн}}^*$  і  $\varphi_{\text{вн}}$  менше його критичного значення, що дозволяє вважати закон розподілу ймовірностей випадкових помилок в розглянутій серії вимірювань нормальним.

Оскільки вихідні сигнали ВСП є функціями від глибини ( $h_i$ ) зміцненого шару контрольованого об'єкту, то рішення про попадання значення глибини в задані межі допуску приймаються на підставі:

$$A_i \leq E(h_i) \leq B_i ; \quad (12)$$

$$A_i^* \leq \varphi(h_i) \leq B_i^* , \quad (13)$$

де  $A_i$ ,  $B_i$ ,  $A_i^*$ ,  $B_i^*$  – нижня і верхня межі допуску на контрольований параметр.

Для ілюстрації допускового контролю та визначення ризиків виробника та замовника проаналізована щільність розподілу ймовірності вихідних сигналів ВСП з імітаційним зразком. Даний розподіл отримано в результаті обробки як експериментальних (крива 1), так і теоретичних даних (крива 2), якій наведено на рис. 6.

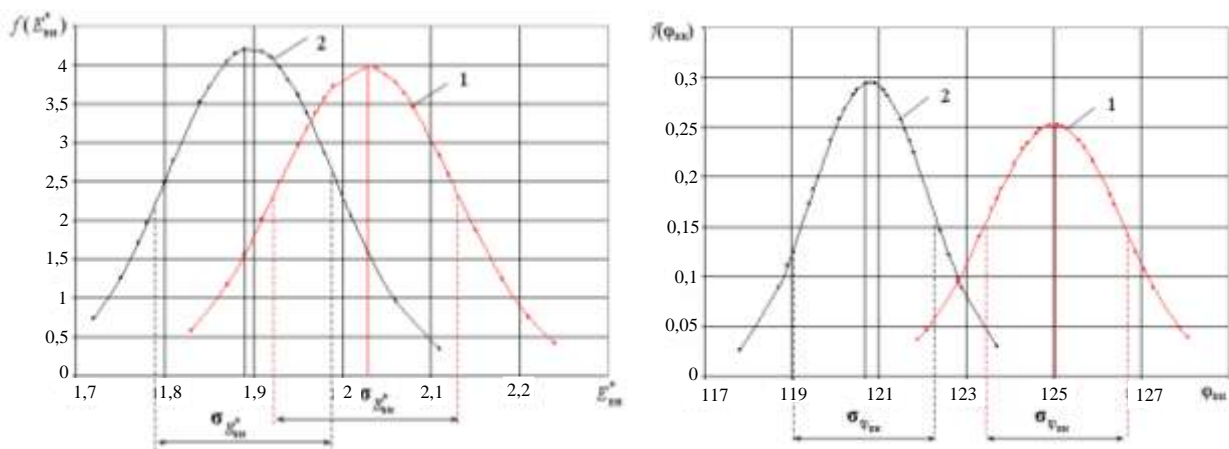


Рисунок 6 – Щільність розподілу ймовірності вихідних сигналів  $E_{\text{вн}}^*$  і  $\varphi_{\text{вн}}$  ВСП з імітаційним зразком

Для оцінки достовірності контролю розглянуто випадок взаємно-пересічних зон допустимих значень сигналів ВСП в комбінації з встановленими замовником допусками на контрольований параметр (рис. 7).

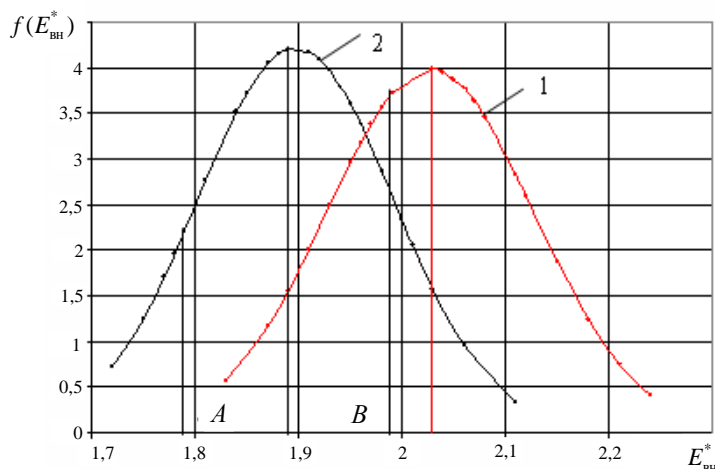


Рисунок 7 – Оцінка достовірності контролю для пересічних областей допустимих значень нормованої внесеної ЕРС ВСП з ОК

Ризики виробника ( $R_B$ ), тобто відбраковування придатного виробу, і замовника ( $R_3$ ), що полягає у визнанні непридатного виробу придатним, визначалися як:

$$R_B = 1 - \int_A^B f(E_{ВН2}^*) dE_{ВН2}^* ; \quad (14)$$

$$R_3 = 1 - \int_A^B f(E_{ВН1}^*) dE_{ВН1}^* . \quad (15)$$

Результати розрахунків  $R_B$  і  $R_3$  при контролі глибини зміцненого шару імітаційного ОК по вихідним сигналам ВСП наведені в таблиці 1.

Таблиця 1 – Визначення ризиків  $R_B$  і  $R_3$  при контролі глибини зміцненого шару по вихідним сигналам ВСП

$f$ , кГц	$h$ , мм	$E_{ВН\text{ ср}}^*$		Допуск, 0,1 h		Допуск, 0,2 h	
		теорія	експерим.	$R_B$ , %	$R_3$ , %	$R_B$ , %	$R_3$ , %
6	0,196	1,897	2,03	23	42	12	28
		$\Phi_{ВН\text{ ср}}$ , град.		Допуск, 0,1 h		Допуск, 0,2 h	
		теорія	експерим.	$R_B$ , %	$R_3$ , %	$R_B$ , %	$R_3$ , %
		120,79	125,05	38	53	27	32

Аналогічним чином проведено розрахунок ризиків виробника та замовника при контролі глибини зміцненого шару для реальних ОК, виконаних із сталі марок Ст. 45, 40Х і сталі 20.

У четвертому розділі розроблено методи вихорострумового контролю глибини зміцненого шару циліндричних виробів. Перший метод полягає в тому, що в процесі проведення зміцнення ОК порівнюють вихідні сигнали ВСП з ОК з сигналами ВСП, в якому розміщений стандартний зразок (СЗ) із заданою глибиною зміцненого шару і виготовлений з того ж матеріалу, що і ОК. Даний метод застосовується у випадках, коли є СЗ або ж відомі електромагнітні характеристики зразка.

В іншому випадку застосовується метод контролю глибини зміцненого шару металевих циліндричних виробів, який полягає в порівнянні поточного і попереднього значень вихідних сигналів ВСП з ОК в процесі зміцнення, які вимірюють через задані оператором інтервали часу, з подальшим визначенням розбіжності між ними

$$\beta_{E_{\text{ВНОК}}^*} = \frac{E_{\text{ВНОК}}^{*n+1} - E_{\text{ВНОК}}^{*n}}{E_{\text{ВНОК}}^{*n+1}} \cdot 100\%, \quad (16)$$

де  $E_{\text{ВНОК}}^{*n+1}$  і  $E_{\text{ВНОК}}^{*n}$  – значення поточного і попереднього нормованого вихідного сигналу ВСП з ОК відповідно.

Якщо дана розбіжність становить менше 3%, то процес зміцнення припиняється і можна прийняти рішення про те, що зразок зміцнився на певну глибину, зазначену в технічній документації для даного виду зміцнення і даного матеріалу. Аналогічним чином визначаються розбіжності вихідних сигналів ВСП з ОК:  $\beta_{\varphi_{\text{ВНОК}}}$ ,  $\beta_{E_{\Sigma\text{ОК}}^*}$  і  $\beta_{\varphi_{\Sigma\text{ОК}}}$ .

На рис. 8 а, б представлені залежності зміни нормованого вихідного сигналу ВСП з ОК ( $E_{\text{ВН}}^*$ ) від тривалості процесу зміцнення при реалізації першого методу (рис. 8, а) та другого методу (рис. 8, б) контролю глибини зміцненого шару ОК.

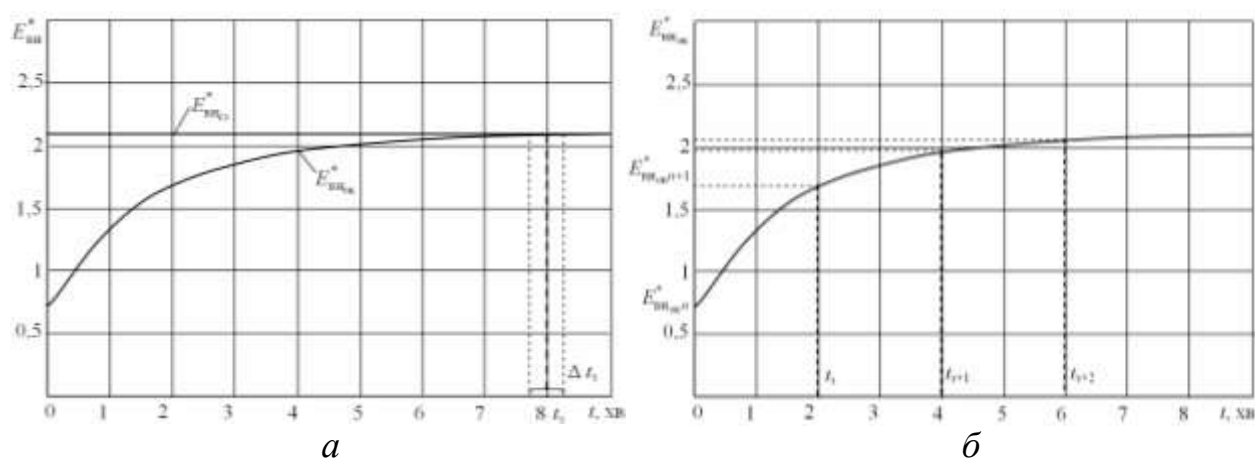


Рисунок 8 – Залежність нормованого вихідного сигналу ВСП з ОК від тривалості процесу зміцнення

Визначення глибини зміцненого шару циліндричних виробів відбувається наступним чином (рис. 8, а): для ОК, виготовленого з певного матеріалу, оператор вибирає тривалість процесу зміцнення  $t_3$ , після закінчення якого передбачається, що на поверхні виробу сформувався зміцнений шар із заданою глибиною. Після закінчення заданого часу визначають значення нормованого вихідного сигналу ВСП з ОК ( $E_{\text{ВН}_{\text{ОК}}}^*$ ), який пройшов процес зміцнення, і порівнюють його або з заздалегідь розрахованим значенням нормованого вихідного сигналу ВСП ( $E_{\text{ВН}_{\text{СЗ}}}^*$ ), або із значенням отриманого нормованого вихідного сигналу ВСП з СЗ ( $E_{\text{ВН}_{\text{СЗ}}}^*$ ), глибина зміцнення якого відповідає заданому значенню. Якщо виконується умова, то процес зміцнення припиняється, в іншому випадку процедура зміцнення і контролю повторюється до виконання даної умови.

Визначення глибини зміцненого шару циліндричних виробів за відсутності СЗ відбувається наступним чином (рис. 8, б): перед початком процесу зміцнення вимірюють нормований вихідний сигнал ВСП з ОК ( $E_{\text{ВН}_{\text{ОК}n}}^*$ ). Далі оператор вибирає інтервал часу для проходження об'єктом процесу зміцнення  $t_3$ . На початковому етапі зміцнення відбувається різка зміна фізико-механічних властивостей виробу, що, в свою чергу, призводить до зміни електромагнітних характеристик виробу, отже, і нормований вихідний сигнал ВСП із зміцненим ОК ( $E_{\text{ВН}_{\text{ОК}}}^*$ ) змінюється значно, тобто значення  $\beta_{E_{\text{ВН}_{\text{ОК}}}^*} \geq 10 \div 20\%$ . Якщо в процесі контролю в заданому інтервалі часу виконується умова  $\beta_{E_{\text{ВН}_{\text{ОК}}}^*} \leq 3\%$ , процес зміцнення припиняється.

Розроблено алгоритм функціонування та блок-схема автоматизованого вихорострумового пристрою (рис. 9), яка реалізує контроль глибини зміцненого шару циліндричних виробів в реальному масштабі часу.

Робота пристрою відбувається наступним чином: блок управління 9 подає команду на включення блоку переміщення 2, який поміщає ОК в установку 4. Далі блок управління 9 вимикає блок переміщення 2 і включає установку для зміцнення 4, в яку поміщений ОК, на заданий в початкових умовах час  $t_3$  для проходження ОК процесу зміцнення поверхні. Після закінчення заданого часу блок управління 9 відключає установку 4 і подає команду на включення блоку переміщення 2, який переміщує ОК з установки для зміцнення 4 в трансформаторний ВСП прохідного типу 3.

За допомогою генератора синусоїдального стабільного струму 1 встановлюються задані значення намагнічувального струму  $I_n$  і його частота  $f$ . Далі, сигнал з трансформаторного ВСП прохідного типу 3 із зміцненим ОК надходить на амплітудний 5 (або фазовий 6) детектор для виділення сигналу, пропорційного  $E_{\text{ВН}_{\text{ОК}}}^*$  (або  $\varphi_{\text{ВН}_{\text{ОК}}}$ ), який подається на блок компараторів 8. Також на блок компараторів 8 із задатчика амплітуди (або фази) 7 подається

опорний сигнал  $E_{\text{ВН}_{\text{СЗ}}}^*$  (або  $\varphi_{\text{ВН}_{\text{СЗ}}}$ ), який попередньо вимірюється або розраховується для ВСП з СЗ.

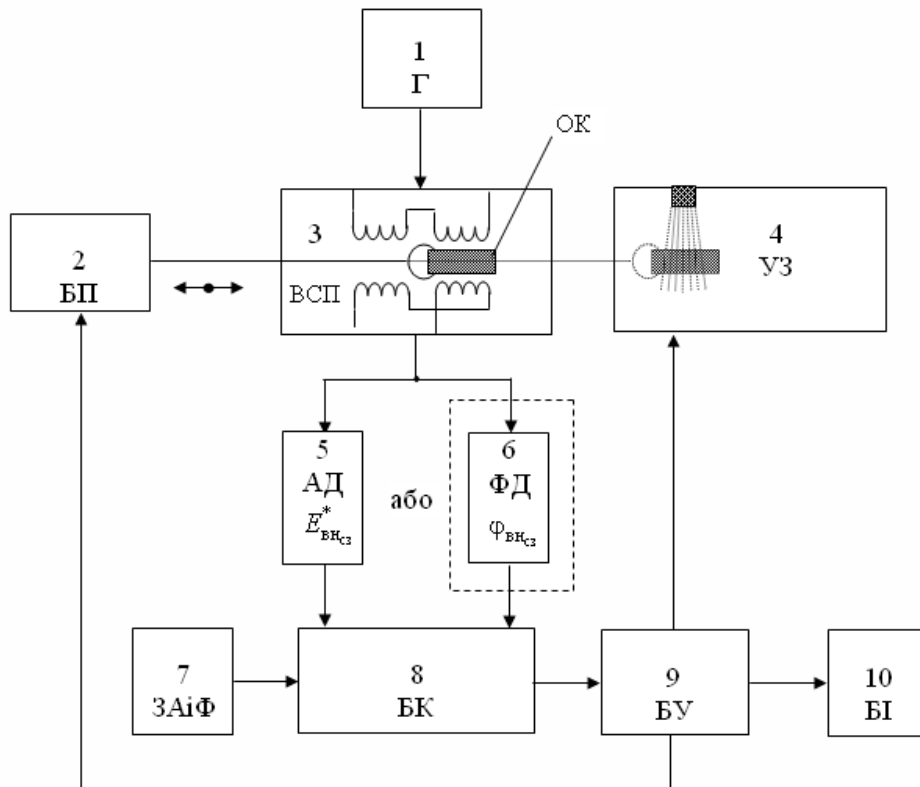


Рисунок 9 – Блок-схема автоматизованого вихорострумowego пристрою для контролю глибини зміцненого шару металевих виробів

Якщо виконується умова  $E_{\text{ВН}_{\text{ОК}}}^* \approx E_{\text{ВН}_{\text{СЗ}}}^*$  (або  $\varphi_{\text{ВН}_{\text{ОК}}} \approx \varphi_{\text{ВН}_{\text{СЗ}}}$ ), то блок управління 9 зупиняє роботу автоматизованого вихорострумowego пристрою та подає сигнал на блок індикації 10. Сигнал на блоці індикації 10 свідчить про те, що ОК зміцнився на задану глибину. У протилежному випадку блок керування 9 подає сигнал на блок переміщення 2, який знову перемістить ОК з ВСП в установку для зміцнення 4, яка продовжить процедуру зміцнення.

Здійснено ряд експериментальних досліджень за допомогою методу амперметра-вольтметра та з використанням потенціометра постійного струму для визначення відносної магнітної проникності і питомої електричної провідності реальних зразків, виготовлених з різних марок сталі: Ст.45, 40Х і сталь 20, і які пройшли процес зміцнення. Експериментальні дані дозволили підтвердити зміну питомої електричної провідності і відносної магнітної проникності зразків після проходження процедури зміцнення і проводити адекватне моделювання вихорострумowego перетворювача з об'єктом контролю.

Виконано порівняння результатів контролю глибини зміцненого шару зразків, виготовлених зі сталі марок Ст. 45, 40Х і сталі 20, отримане розробленим вихорострумowym і металографічним методом, яке показало, що розбіжність не перевищує 15%.



## ВИСНОВКИ

В дисертаційній роботі вирішена науково-практична задача створення теоретично обґрунтованого методу та пристрою для контролю глибини поверхнево зміцненого шару металевих циліндричних виробів.

1. На основі розробленої фізико-математичної моделі ВСП-ОК отримано вирази для розрахунку вихідних сигналів параметричного та трансформаторного перетворювачей прохідного типу, які містять інформацію про глибину зміцненого шару об'єкта контролю, визначено частотний діапазон роботи ВСП, що становить  $f < 40$  кГц.

2. На підставі проведених експериментальних досліджень ВСП із зміцненим циліндричним виробом (імітаційний зразок і реальні зміцнені зразки) доведена адекватність розробленої фізико-математичної моделі системи ВСП-ОК, показана можливість визначення глибини зміцненого шару виробів за параметрами вихідних сигналів ВСП з ОК, визначена розбіжність між дійсними і отриманими в результаті експериментальних досліджень значеннями глибини зміцненого шару зразків, яка не перевищує 15%.

3. Розроблено метод вихорострумовею контролю глибини зміцненого шару виробів, що полягає в порівнянні вихідних сигналів ВСП із зміцнюваним ОК із заздалегідь розрахованими вихідними сигналами ВСП з ОК, виготовленого з того ж матеріалу з заданою глибиною зміцненого шару (або з вихідними сигналами ВСП зі стандартним зразком, глибина зміцнення якого відповідає заданому значенню). Також розроблено метод вихорострумовею контролю глибини зміцненого шару металевих циліндричних виробів, який полягає у порівнянні попереднього і поточного значень вихідних сигналів перетворювача із зміцнюваним об'єктом контролю, виміряних через задані інтервали часу.

4. Проведено оцінку ризиків виробника та замовника з урахуванням меж допуску при контролі глибини зміцненого шару імітаційного зразка і реальних зміцнених зразків по вихідним сигналам ВСП. Отриманні значення ризиків виробника та замовника для імітаційного зразка не перевищують 23% і 42% відповідно (по амплітуді) та 38% і 53% (по фазі) у випадку допуску  $0,1h$ . Для реальних зразків дані ризики у середньому не перевищують 40% і 60% (по амплітуді) та 50% і 70% (по фазі).

5. Розроблено структурну схему та виготовлено макет вихорострумовею пристрою для контролю глибини зміцненого шару металевих циліндричних виробів, що дозволяє проводити контроль об'єктів в реальному масштабі часу.

6. Результати роботи впроваджено на ПП "ДДП" (м. Миколаїв), в навчальному процесі на кафедрі приладів і методів неруйнівного контролю НТУ "ХПІ" та на кафедрі електричних машин НТУ "ХПІ".

## СПИСОК ПРАЦЬ, ОПУБЛІКОВАНИХ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Тищенко А. А. Модель вихретокового преобразователя проходного типа с токопроводящим цилиндрическим образцом / Б. М. Горкунов,

И. В. Тюпа, А. А. Тищенко // Технічна електродинаміка. – Київ, 2007. – Тем. вип., ч.5. – С. 45–48.

*Здобувачем запропоновано фізико-математична модель взаємодії вихорострумового перетворювача з об'єктом контролю, який пройшов процес зміцнення, та отримано основні співвідношення.*

2. Тищенко А. А. Работа вихретокового преобразователя при контроле токопроводов / Б. М. Горкунов, С. Н. Глоба, И. Х. Шахин, А. А. Тищенко // Технічна електродинаміка. – Київ, 2008. – Тем. вип., ч.2. – С. 68–69.

*Здобувачем досліджено розподіл питомої електричної провідності в перетині зміцненого шару об'єкта контролю.*

3. Тищенко А. А. Моделирование вихретокового преобразователя для контроля поверхностных слоев металлических изделий / Б. М. Горкунов, Н. Н. Сиренко, И. В. Тюпа, А. А. Тищенко // Вісник НТУ "ХПІ". – Харків: НТУ "ХПІ". – 2008. – №48. – С. 72–77.

*Здобувачем отримано вирази для визначення складових комплексного опору котушки перетворювача при контролі поверхневих шарів металевих виробів.*

4. Тищенко А. А. Выбор рациональных размеров катушек вихретокового преобразователя для контроля металлических изделий / Б. М. Горкунов, И. В. Тюпа, А. А. Тищенко // Вісник НТУ "ХПІ". – Харків: НТУ "ХПІ". – 2008. – №49. – С. 26–32.

*Здобувачем отримані залежності комплексного опору перетворювача від глибини зміцненого шару виробу для різних конфігурацій котушок.*

5. Тищенко А. А. Расчетная модель взаимодействия поверхностного упрочненного слоя с вихретоковым преобразователем / Б. М. Горкунов, И. В. Тюпа, А. А. Тищенко // Вісник НТУ "ХПІ". – Харків: НТУ "ХПІ". – 2009. – №14. – С. 100–103.

*Здобувачем отримані основні співвідношення, які описують взаємодію вихорострумового перетворювача з об'єктом контролю.*

6. Тищенко А. А. Анализ методов и устройств для контроля упрочненного слоя металлических изделий / Б. М. Горкунов, А. А. Тищенко // Вісник НТУ "ХПІ". – Харків: НТУ "ХПІ". – 2010. – №12. – С. 128–135.

*Здобувачем оцінено стан та розвиток методів і пристроїв контролю зміцненого шару виробів, вказані переваги та недоліки.*

7. Тищенко А. А. Выбор материала магнитопровода для электрических машин с катящимся ротором / А. А. Авраменко, А. А. Тищенко, А. М. Масленников // Вісник НТУ "ХПІ". – Харків: НТУ "ХПІ". – 2010. – №36. – С. 3–8.

*Здобувачем отримані результати експериментального дослідження матеріалів, які виготовлені із сталі, що пройшли хіміко-термічну обробку.*

8. Тищенко А. А. Метод суперпозиции при определении глубины упрочненного слоя вихретоковым методом / Б. М. Горкунов, А. А. Тищенко // Вісник НТУ "ХПІ". – Харків: НТУ "ХПІ". – 2011. – №19. – С. 94–97.

*Здобувачем запропоновано метод суперпозиції при визначенні глибини зміцненого шару об'єкта контролю.*

9. Тищенко А. А. Исследование токопроводящих слоистых структур вихретоковым методом / Б. М. Горкунов, И. В. Тюпа, А. А. Тищенко // Вісник НТУ "ХПІ". – Харків: НТУ "ХПІ". – 2011. – №48. – С. 118–121.

*Здобувачем проведено дослідження властивостей матеріалів, що є набором трубок для імітації зразків з різними структурами поверхні.*

10. Тищенко А. А. Принятие решений в задачах элетромагнитного неразрушающего контроля / Б. М. Горкунов, И. В. Тюпа, А. А. Тищенко, В. Г. Левченко, В. В. Скопенко // Вісник НТУ "ХПІ". – Харків: НТУ "ХПІ". – 2012. – №3. – С. 130–135.

*Здобувачем проведена оцінка достовірності контролю глибини зміцненого шару об'єктів вихрострумowego контролю з урахуванням систематичних і випадкових похибок вимірювання вихідних сигналів перетворювача.*

11. Пат. на корисну модель №52844 (Україна), МПК(2010) G01N27/90. Вихрострумовой спосіб контролю поверхневого зміцнення / Горкунов Б. М., Тюпа І. В., Тищенко А. А.; заявник і власник НТУ"ХПІ". – №u201003240 ; заяв. 22.03.2010 ; надрук. 10.09.2010, Бюл. №17.

*Здобувачем розроблено макет пристрою, якій реалізує безконтактний вихорострумовой метод контролю поверхневого зміцнення металевих виробів.*

12. Тищенко А.А. Работы НТУ "Харьковский политехнический институт" в области НК / Г.М. Сучков, Б.М. Горкунов, И.В. Тюпа, А.А. Авраменко, А.В. Десятниченко, А.А. Келин, Е.Л. Ноздрачева, Ю.В. Хомяк, Л.В. Глебова, И. Нестерова, А.А. Тищенко // Неразрушающий контроль и техническая диагностика в промышленности – 2008: междунар. науч.-техн. конф., 11–13 марта 2008 г. : тезисы докл. – Москва : Машиностроение. – 2008. – С. 191–193.

*Здобувачем проведено аналіз впливу фізико-механічних властивостей зміцнених об'єктів на їх електромагнітні параметри.*

13. Тищенко А.А. Приближенная модель вихретокового преобразователя для контроля поверхностных слоев металлических изделий / Б.М. Горкунов, И.В. Тюпа, А.А. Тищенко // Інформаційні технології: наука, техніка, технологія освіта, здоров'я – 2008 : міжнар. наук.-техн. конф., 4–6 червня 2008 р. : тези допов. – Харків : НТУ "ХПІ". – 2008. – Ч.1. – С. 407.

*Здобувачем запропоновано спрощена модель вихорострумowego перетворювача прохідного типу з геометрією витка еквівалентного глибині проникнення електромагнітного поля в об'єкт контролю.*

14. Тищенко А.А. Моделирование вихретокового преобразователя с металлическим изделием для различных конфигураций измерительных катушек / Б.М. Горкунов, И.В. Тюпа, А.А. Тищенко // Проблемы інформатики и моделирования – 2008 : междунар. науч.-техн. конф., 26–28 ноября 2008 г. : матер. конф. – Харків : НТУ "ХПІ". – 2008. – С. 21.

*Здобувачем знайдено раціональні розміри котушок перетворювача.*

15. Тищенко А.А. Модель вихретокового преобразователя для контроля поверхностных слоев цилиндрических изделий / А.А. Тищенко //

Інформаційні технології: наука, техніка, технологія освіти, здоров'я – 2009 : міжнар. наук.-техн. конф., 20–22 травня 2009 р. : тези допов. – Харків : НТУ "ХПІ". – 2009. – Ч.1. – С. 528.

16. Тищенко А.А. Контроль глибини поверхнево зміцнених шарів металевих виробів вихрострумовим методом / А.А. Тищенко // Приладобудування: стан і перспективи – 2010 : міжнар. наук.-техн. конф., 27–28 квітня 2010 р. : матер. конф. – Київ : ПФФ, НТУУ "КПІ". – 2010. – С. 215–216.

17. Тищенко А.А. Реконструкция структуры упрочненного слоя по результатам вихретокового контроля / И.В. Тюпа, А.А. Тищенко // Радиоэлектроника и молодежь в XXI веке – 2011 : междунар. науч.-техн. конф., 18–20 апреля 2011 г. : матер. конф. – Харьков : ХНУРЭ. – 2011. – Т.2. – С. 257–258.

*Здобувачем запропоновано метод визначення глибини зміцненого шару металевих виробів на основі рішення зворотних задач електромагнітного поля.*

18. Тищенко А.А. Экспериментальные исследования имитационной физической модели упрочненных объектов // А.А. Тищенко // Сучасні прилади, матеріали і технології для неруйнівного контролю і технічної діагностики машинобудівного і нафтогазопромислового обладнання – 2011 : міжнар. наук.-техн. конф., 29 листопада–2 грудня 2011 р. : тези допов. – Івано-Франківськ : ІФНТУНГ. – 2011. – С. 88–89.

## АНОТАЦІЇ

**Тищенко А. А. Електромагнітний метод та пристрій для контролю глибини механічного зміцнення металевих циліндричних виробів. – На правах рукопису.**

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.11.13 – прилади і методи контролю та визначення складу речовин. Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут", Харків, 2013.

Дисертаційна робота полягає в розробці методу та пристрою для контролю глибини поверхнево зміцненого шару металевих циліндричних виробів на основі порівняння вихідних сигналів вихрострумового перетворювача з об'єктом контролю із заздальгідь розрахованими вихідними сигналами для заданої глибини зміцнення, враховуючи похибки моделювання та вимірювання.

В дисертаційній роботі розроблені теоретичні положення та отримано вирази для знаходження вихідних сигналів прохідного вихрострумового перетворювача, які містять інформацію про глибину зміцненого шару об'єкта контролю, на підставі розрахунку фізико-математичної моделі взаємодії вихрострумового перетворювача з циліндричним об'єктом контролю, яка базується на суперпозиції елементарних магнітних кільцевих вихрових струмів в об'єкті контролю. Підготовлені та проведені експериментальні

дослідження на ідеалізованих моделях і реальних об'єктах, що підтверджують адекватність та коректність проведених в роботі досліджень. Розроблено макет автоматизованого вихрострумовевого пристрою, що дозволяє проводити контроль глибини зміцненого шару металевих циліндричних виробів в лабораторних умовах при відпрацюванні технології. Макет реалізований із застосуванням стандартної високоточної апаратури.

*Ключові слова:* прилади неруйнівного контролю, вихрострумовевий контроль, глибина зміцненого шару, циліндричний об'єкт контролю, відносна магнітна проникність, питома електрична провідність.

**Тищенко А. А. Электромагнитный метод и устройство для контроля глубины механического упрочнения металлических цилиндрических изделий. – На правах рукописи.**

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.11.13 – приборы и методы контроля и определения состава веществ. Национальный технический университет "Харьковский политехнический институт", Харьков, 2013.

Диссертационная работа состоит в разработке метода и устройства для контроля глубины упрочненного слоя металлических цилиндрических изделий на основе сравнения выходных сигналов вихретокового преобразователя с объектом контроля с заранее рассчитанными выходными сигналами для заданной глубины упрочнения, учитывая погрешности моделирования и измерения.

В диссертационной работе разработаны теоретические положения и получены выражения для определения выходных сигналов проходного вихретокового преобразователя, как параметрического, так и трансформаторного типов, которые содержат информацию о глубине упрочненного слоя объекта контроля, на основании расчета физико-математических моделей взаимодействия вихретокового преобразователя с цилиндрическим упрочненным образцом, которые базируются на суперпозиции элементарных кольцевых вихревых токов в объекте контроля.

Определено влияние межвитковых и межслойных емкостных связей на результат контроля и выбран частотный диапазон работы преобразователя.

Проведены экспериментальные исследования на идеализированных моделях и реальных объектах, выполненных из различных материалов, подтверждающие адекватность и корректность проведенных в работе исследований. Показана возможность определения границы перехода между упрочненным слоем и "сырым" металлом по измеренным выходным сигналам вихретокового преобразователя.

Получены выражения для определения рисков изготовителя и заказчика с учетом границ допуска при контроле глубины упрочненного слоя имитационного образца и реальных упрочненных объектов контроля по выходным сигналам вихретокового преобразователя.

Разработан макет автоматизированного вихретокового устройства, позволяющий проводить контроль глубины упрочненного слоя

металлических цилиндрических изделий в лабораторных условиях при отработке технологии. Данный макет реализован с применением стандартной высокоточной измерительной аппаратуры.

Проведены экспериментальные исследования по определению электромагнитных характеристик исследуемых образцов, которые позволили подтвердить изменение удельной электрической проводимости и относительной магнитной проницаемости образцов после прохождения процедуры упрочнения и проводить адекватное моделирование по разработанным физико-математическим моделям вихретокового преобразователя с объектом контроля. Определено расхождение определения глубины упрочненного слоя металлических изделий между металлографическим и вихретоковым методом контроля.

*Ключевые слова:* приборы неразрушающего контроля, вихретоковый контроль, глубина упрочненного слоя, цилиндрический объект контроля, относительная магнитная проницаемость, удельная электрическая проводимость.

**Tyshchenko A. A. Electromagnetic method and device for control of the depth of the mechanical strength of metallic cylindrical products. – A manuscript.**

Dissertation for scientific degree of candidate of technical sciences in specialty 05.11.13 – Instruments and methods of control and composition determination of substances. National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute", Kharkiv, 2013.

The dissertation is devoted to developing of method and device for control of the depth of the hardened surface layer of the metallic cylindrical samples by comparing the output signals of eddy current transformer with an object of control with a pre-calculated output signals for a given depth of hardening, taking into account the errors of modelling and measurement.

The theoretical positions and obtained expressions for the determination of the output signals of eddy current transformer, which contain information about the depth of the hardened layer of the object of control based on the calculation of physical and mathematical model of eddy current transformer with a cylindrical object of control, which is based on the superposition of the elementary magnetic annular eddy currents in the object of control are developed. Prepared and conducted experimental research on the idealized models and real objects, confirming the adequacy and correctness of the work conducted in research. Developed layout automated eddy current device, which allows the control of the depth of the hardened layer of metallic cylindrical products in laboratory conditions with the working off technology. Layout is implemented using a standard high-precision equipment.

*Key words:* devices for non-destructive control, eddy current control, the depth of the hardened layer, cylindrical object of control, relative magnetic permittivity, specific electrical conductivity.