

СЕКЦІЯ 7
НЕРУЙНІВНИЙ КОНТРОЛЬ, ТЕХНІЧНА ТА МЕДИЧНА
ДІАГНОСТИКА

УДК 620.179

ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ СУЧАСНОГО НЕРУЙНІВНОГО КОНТРОЛЮ

*Маєвський С.М., Національний технічний університет “Київський політехнічний
інститут”, м. Київ, Україна*

Неруйнівний контроль зайняв чинне місце серед напрямків діяльності людини. Сьогодні ні будівництво, ні транспорт, ні енергетика не здатні існувати без неруйнівного контролю. Розвиток техніки та технології постійно стимулюють розвиток методів та систем неруйнівного контролю.

Серед основних постійно діючих напрямків розвитку неруйнівного контролю слід перш за все назвати *підвищення роздільної здатності та вірогідності контролю*. Це особливо важливо в останні роки, коли набирає обертів впровадження в багатьох напрямках техніки сучасних технологій та матеріалів. Підвищення роздільної здатності вимагає контроль нових композитних матеріалів та тонкого керамічного покриття традиційних конструкційних матеріалів.

Дуже гостро сьогодні стала *проблема автоматизація засобів неруйнівного контролю*. Поряд зі створенням нових автоматичних систем контролю настала необхідність перетворення традиційних дефектоскопів в автоматизовані системи з автоматичним незалежно від дефектоскопіста записом просторових координат положення вимірювального перетворювача дефектоскопу разом з його вихідним сигналом в цифровому стандарті. Вирішення цієї проблеми дасть можливість забезпечити об'єктивність контролю, з однієї сторони, та можливість використання результатів контролю для моніторингу об'єктів, з іншої сторони. Це особливо важливо для тих галузей техніки (авіабудування, енергетика), де необхідність використання традиційних дефектоскопів ультразвукового та вихрострумового контролю пояснюється складною будовою поверхні об'єктів контролю.

Наступною проблемою, яка особливо гостро постала перед неруйнівним контролем, можемо назвати проблему *визначення стану матеріалу* конструкцій, що несуть великі навантаження. Це мостові переходи, нафтосховища, будівельні конструкції, тощо. Відомі методи діагностування стану втоми конструкційних матеріалів, як метод контролю стану феромагнітних матеріалів на основі використання ефекту Баркгаузена та універсальний метод визначення втоми матеріалів конструкцій на основі прецизійного вимірювання фазової швидкості ультразвуку, на сьогодні мало розвинені і не знайшли широкого застосування. Необхідно виділення коштів на дослідження та впровадження методів та засобів на їх основі.

До інших проблем необхідного розвитку неруйнівного контролю слід назвати створення та широке впровадження вітчизняних систем контролю якості енергетичного устаткування, контролю параметрів технологічних процесів, контролю корозійного стану матеріалів конструкцій газо- та нафтодобувного устаткування.

В Україні продовжує існувати значний науковий потенціал в галузі неруйнівного контролю та існує значна кількість наукових розробок, використання котрих могло б привести до створення вітчизняних систем ультразвукового контролю на основі використання фазокерованих дискретних перетворювачів, створення автоматичних систем вихрострумового контролю.

УДК 620.179.16

УЛЬТРАЗВУКОВОЙ КОНТРОЛЬ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ГАЗОТУРБИННЫХ ВАЛОВ

*Соколов С.Л., Яровой А.А., Национальный университет кораблестроения, г. Николаев,
Украина*

В настоящее время разработка средств и методики ультразвукового контроля сварных соединений узлов газовых турбин является актуальной задачей. Одним из наиболее ответственных узлов, работающих при повышенных температурах, является вал турбины, который состоит из двух деталей: фланца и хвостовика. Соединение деталей происходит с помощью электронно-лучевой сварки (ЭЛС). Стык представляет собой соединение замкового типа. В качестве конструкционных материалов для изготовления данных узлов применяются нержавеющие жаропрочные сплавы: ЭП-609 (07X12НМБФ) и ЭИ-961 (13X11Н2В2МФ).

Несмотря на то, что технология изготовления валов предусматривает удаление валика шва, при ультразвуковом контроле данных соединений существующими до настоящего время средствами возникает ряд проблем, связанных с наличием ложных сигналов, отраженных от подложки и технологических прихваток, что существенно влияет на достоверность контроля. Возникают также трудности с выявлением вертикально ориентированных плоскостных дефектов, характерных для ЭЛС.

Для ультразвукового контроля этих сварных соединений нами разработаны многоэлементные акустические системы, состоящие из отдельно-совмещенных преобразователей хордового типа, которые обеспечивают прозвучивание всего сечения шва прямым лучом. Проведенные экспериментальные исследования показали, что при контроле преобразователями данного типа уверенно выявляются плоскостные дефекты площадью 0,5 мм² и дефекты округлой формы диаметром 0,6 мм и более. Соотношение полезный сигнал/шум составляет не менее 20 дБ относительно плоскодонного отражателя диаметром 1 мм.

Ключевые слова: ультразвуковой контроль, газотурбинные валы, сварные соединения, преобразователи.

УДК 620.178.15

ПРИЛАД ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ФІЗИКО-МЕХАНІЧНИХ
ВЛАСТИВОСТЕЙ ПОВЕРХНЕВОГО ШАРУ МАТЕРІАЛІВ В
НАНОМЕТРИЧНОМУ ДІАПАЗОНІ

Ігнатович С.Р., Закієв І.М., Національний авіаційний університет, м. Київ, Україна

Прилад призначений для дослідження фізико-механічних властивостей поверхневого шару матеріалів методами наноіндентування та наносклерометрії.

Метод наноіндентування реалізується шляхом безперервного вдавлювання індентора в поверхню з автоматичною реєстрацією навантаження на індентор (P) та глибини його проникнення (h) в поверхню матеріалу. Навантаження на індентор задається від 0 до 6 Н, діапазон переміщення індентора складає $10 \dots 2 \cdot 10^5$ нм. При індентуванні отримується діаграма навантаження $P=f(h)$, автоматизована обробка якої дозволяє одержувати принципово нову, у порівнянні зі стандартним методом іспитів на мікротвердість, інформацію. Мікротвердість визначається по параметру h , що виключає трудомісткий процес вимірювання діагоналей відбитка. За рахунок можливості фіксувати переміщення індентора в нанометричному діапазоні мікротвердість визначається у діапазоні малих та надмалих навантажень.

Визначається також робота, яка поглинається матеріалом при вдавлюванні індентора, та робота пружних деформацій. Окрім цього прилад дає можливість вивчати особливості мікродеформації матеріалів по кінетиці вдавлювання індентора; реєструвати мікроповзучість матеріалів; вимірювати градієнт властивостей по глибині вдавлювання; випробувати м'які (полімерні) матеріали, а також матеріали, у яких відбиток суттєво змінює розміри після зняття навантаження; вимірювати крихкість та пружність матеріалів.

Метод наносклерометрії базується на безперервній реєстрації опору руху індентора по поверхні з заданим навантаженням. Визначаються нормальна та тангенціальна складові сили опору. Автоматизована обробка статистичних характеристик опору локальних мікрооб'єктів матеріалу контактному деформуванню дозволяє зробити комплексну оцінку стану поверхневого шару на трасі сканування. Зокрема: оцінювати середню міцність поверхневого шару на трасі сканування; оцінювати розкид і неоднорідність твердості; моделювати елементарні акти процесів тертя та зношення.

При скануванні індентора з практично нульовим навантаженням (10^{-3} Н) з наступною автоматизованою обробкою профілограм можна отримати кількісну топографію поверхні у нанометричному діапазоні.

Для візуалізації місць контролю прилад оснащений оптичним мікроскопом з вмонтованою цифровою відеокамерою. Програмне забезпечення приладу передбачає автоматизовану обробку зображення.

Ключові слова: мікротвердість, наноіндентування, наносклерометрія, топографія поверхні.

**УДОСКОНАЛЕННЯ УЛЬТРАЗВУКОВОГО МЕТОДУ КОНТРОЛЮ
ТЕХНІЧНОГО СТАНУ МАГІСТРАЛЬНИХ ГАЗОПРОВІДІВ**

*Мандра А.А., Лютак З.П., Івано-Франківський національний технічний університет
нафти і газу, м. Івано-Франківськ, Україна*

Трубопровідний транспорт є однією із основних складових енергетичної галузі країни. Магістральні газопроводи проходять через всю країну та через всі географічні місцевості до яких належать і такі як Донбас, Карпати, Крим тощо. Кожна географічна місцевість має свої кліматичні особливості. Зважаючи на велику відмінність однієї місцевості від іншої, магістральні трубопроводи піддаються деструктивним чинникам впливу різного характеру та інтенсивності. Така різноманітність деструктивного впливу приводить до зміни властивостей металу трубопроводів, що лімітує термін їх експлуатації до нормативних значень і не забезпечує використання їх повного ресурсу.

Враховуючи факт, що більша частина магістрального трубопровідного транспорту нафтогазового комплексу України експлуатується понад встановлений термін, удосконалення методу контролю властивостей трубних сталей в експлуатаційних умовах є актуальною задачею.

В сучасних методиках ультразвукового контролю технічного стану труб використовуються методи визначення швидкості або часу поширення ультразвуку об'ємної хвилі в точці вимірювання. Таку методику неможливо застосувати при визначенні напружень в труднодоступних місцях об'єкту контролю, наприклад, в місцях кріплення труби хомутом, опор тощо. Дану задачу можна успішно вирішити використовуючи ведучі ультразвукові хвилі, які поширюються вздовж труби. В цьому випадку стінка труби виконує роль хвилеводу ультразвукової хвилі.

Особливістю таких хвиль є те, що їх коливна енергія поширюється в об'ємі, який визначається границями розділу середовищ, а не у всі напрямки, як у об'ємних хвиль. Це дозволяє ведучим ультразвуковим хвилям поширюватись на набагато більші відстані, аніж об'ємним.

Рівняння, яке математично описує коливання ведучих ультразвукових хвиль є таким:

$$\Phi = A_{(L)} e^{i\omega(N \cdot X / c_l - t)} , \quad \Psi = A_{(S)} e^{i\omega(N \cdot X / c_t - t)} , \quad (1)$$

де Φ , Ψ - відповідно поздовжнє та поперечне хвильове поле; $A_{(L)}$, $A_{(S)}$ - відповідно амплітуди поздовжньої та поперечної хвиль; ω - частота; N – одиничний вектор напрямку поширення хвиль; $X\{x_1, x_2, x_3\}$ – координати; c_l , c_t – відповідно швидкості поздовжньої та поперечної об'ємних хвиль; t – час.

Зроблено математичний опис поширення ведучих хвиль в двохвимірному просторі, що дає можливість їх практично використати для контролю технічного стану магістральних газопроводів.

Ключові слова: ультразвук, трубопровід, ведучі хвилі.

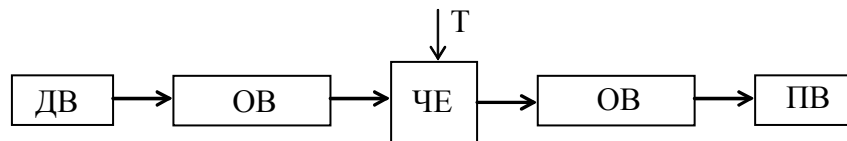
УДК 681.586

ПЕРЕДАВАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА ВОЛОКОННО–ОПТИЧНОГО ДАТЧИКА (ВОД) ТЕМПЕРАТУРИ

*Турияця І.І., Бутурлакін О.П., Кутчак С.В., Козусенко О.В., Ужгородський національний
університет, м. Ужгород, Україна*

Однією з важливих характеристик сенсора є його передавальна характеристика, яка визначається структурною схемою, конструкцією та ін.

Нами розрахована і досліджена передавальна характеристика ВОД температури, оптична схема якого приведена на рис. 1.



ДВ – джерело випромінювання (АЛ 107А); ОВ – оптичне волокно;
ЧЕ – чутливий елемент з напівпровідникового халькогенідного скла (Ge–Sb–Se);
ПВ – приймач випромінювання (ФД-265А)

Рисунок 1 – Оптична схема ВОД температури

Принцип роботи ВОД базується на зміні пропускання ЧЕ від температури на фіксованій довжині хвилі ($\lambda=0,96$ мкм). Використання в якості ЧЕ халькогенідного скла дає можливість оптимального вибору складу сенсора з порівняно великої області склоутворення в системі Ge-Sb-Se.

Потужність світлового потоку, який попадає на ПВ, знаходилась з врахуванням імпульсного режиму живлення ($f=10^3$ Гц), діаграми направленості і площі випромінюваної поверхні світлодіода, поперечного перерізу оптичних волокон, а також втрат на Френелівське відбивання на границях розділу елементів ВОД, зміні пропускання ЧЕ від температури.

Передавальна характеристика ВОД $U, \text{мВ}$ розраховувалась враховуючи спектральні чутливості фотодіода та спектральні густини випромінювання світлодіода згідно методики [1]. Досліджено вплив на неї температури джерела і приймача світла в діапазоні 213–358 К (рис.2).

Представлені результати свідчать про необхідність термостабілізації джерела і приймача при проектуванні апаратури з використанням ВОД.

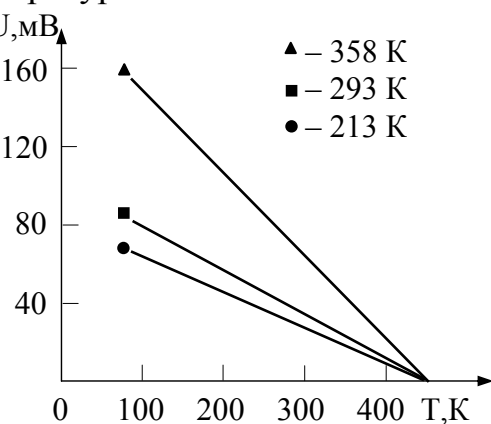


Рисунок 2

Ключові слова: сенсор, передавальна характеристика, халькогенідне скло.

Література

1. Криксунов Л.З. Справочник по основам инфракрасной техники. – М., 1978. – 400 с.

УДК 543.422

ВПЛИВ КОНСТРУКТИВНИХ ОСОБЛИВОСТЕЙ ПВП НА МЕТРОЛОГІЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ІЧ-ГАЗОАНАЛІЗАТОРІВ ВУГЛЕКИСЛОГО ГАЗУ

Повхан Т.І., Ужгородський національний університет, м. Ужгород, Україна

Розглядаються результати досліджень впливу конструктивних особливостей первинного вимірювального перетворювача (ПВП) ІЧ-газоаналізатора CO_2 на його метрологічні характеристики.

На підставі результатів дослідження конструктивних особливостей ІЧ-газоаналізаторів CO_2 , які є присутні на ринку України і використовуються при регулюванні процесу спалювання пального в двигунах внутрішнього згорання, встановлено, що прилади багатьох виробників мають негерметичну конструкцію оптичних блоків, тому відрізки оптичного шляху променів між джерелом випромінювання і вхідним вікном вимірювальної кювети, та між вихідним вікном кювети і чутливим елементом приймача випромінювання мають зв'язок з атмосферою. Зміна концентрації CO_2 в атмосфері (від 0,03 % об'ємної долі в чистій атмосфері до декількох процентів в атмосфері сильно загазованих приміщень) призводить до зміни умов проходження випромінювання на цих відрізках оптичного шляху, а як наслідок до суттєвого зниження часової стабільності роботи приладів та виникнення додаткової похибки вимірювань, яка суттєво перевищує задекларовану виробниками величину.

Оцінка довжини оптичного шляху променів поза межами вимірювальної кювети показала, що вона у різних конструкціях оптичних блоків складає від 5 до 15 см. Проведена оцінка впливу виду вимірювальної схеми на величину додаткової похибки вимірювань. Показано, що при використанні однопроменевої двоканальної (багатоканальної) схеми додаткова похибка при вимірюванні вмісту CO_2 , обумовлена негерметичністю оптичного блока, значно більша ніж при використанні двопробевої одноканальної схеми. Виявлено, що в переважній більшості нових моделей газоаналізаторів використовується однопробова двоканальна (багатоканальна) вимірювальна схема.

Показано, що ефективним засобом протидії виникненню додаткової похибки вимірювання концентрації CO_2 і забезпеченню високої часової стабільності газоаналізаторів є надійна герметизація ПВП і видалення з внутрішнього об'єму вуглекислого газу і води.

Ключові слова: газоаналізатор, вуглекислий газ, оптичний блок, вимірювальна кювета, часова стабільність, похибка.

УДК 621.317

МЕТОД ВИМІРЮВАННЯ ШВИДКОСТІ УЛЬТРАЗВУКУ

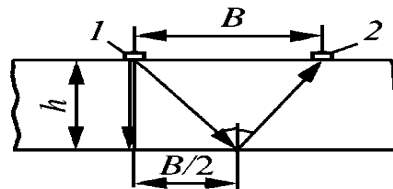
Баженов В.Г., Лігоміна С.М., Національний технічний університет України “Київський політехнічний інститут”, м. Київ, Україна

Вимірювання швидкості ультразвуку є найбільш перспективним методом визначення фізико-механічних характеристик об'єкту контролю (ОК), його міцності та залишкового ресурсу в ультразвуковому неруйнівному контролі.

Для визначення швидкості найбільш розповсюдженим є вимірювання часу розповсюдження ультразвуку в ОК. Для визначення швидкості необхідно також виміряти базу вимірювання, тобто довжини шляху розповсюдження ультразвуку.

Для визначення бази звичайно використовується механічний метод виміру лінійних розмірів, що не завжди є зручним.

Для вирішення даного питання Королевым В.М. , а пізніше Шевалдикіним В.Г. запропоновано метод визначення швидкості за виміром часу пробігу до дна ОК не тільки прямим перетворювачем t_h , але також двома похилими перетворювачами, розташованими на відстані B t_B (рис.1)



Швидкість обчислюють за формулою

$$C = \frac{B}{\sqrt{t_B^2 - t_h^2}}$$

Авторами пропонується обрати розміри випромінюючого та приймального перетворювача значно меншими довжини хвилі (точковий випромінювач). Фактично такий випромінювач випромінює сферичну хвилю, що дозволяє уникнути похибок, що обумовлені відмінністю хвильового фронту перетворювача з розмірами, що перевищують декілька довжин хвиль від плоского або сферичного. Крім того, точковий перетворювач дозволяє дуже точно визначити базу вимірювання, що підвищує точність вимірювання швидкості.

В статті виконано математичне моделювання даного методу. Було досліджено вплив на похибку вимірювання швидкості розмірів перетворювачів, відстані між перетворювачами, розміру h та швидкості ультразвуку в ОК.

Ключові слова: швидкість ультразвуку, математичне моделювання, похибка вимірювань.

УДК 621.923

КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА ПОЛИРОВАННЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ ИЗДЕЛИЙ
ИЗ НЕМЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

Качество полированных поверхностей изделий из неметаллических материалов (природных и искусственных строительных и поделочных камней) в промышленных условиях традиционно оценивается их блеском и четкостью отражения предметов. Такая оценка – субъективна и зависит от условий, при которых производится оценка отражающей способности.

Для количественной оценки качества полированных поверхностей целесообразно использовать параметры шероховатости Ra , Rz , $Rmax$, а также коэффициент отражения света K . Ограничение выбора параметров шероховатости для оценки качества полированных поверхностей высотными параметрами обуславливается сравнительной простотой их измерения при помощи профилометров-профилографов, которые есть в наличии практически на любом камнеобрабатывающем предприятии.

Недостатком метода профилометрии является его достаточно высокая погрешность измерений (до 20 %). Высокой точностью измерений характеризуются оптические методы оценки качества полированной поверхности по коэффициенту отражения света.

Шероховатость полированных поверхностей оценивалась параметрами Ra , Rz , $Rmax$ при помощи профилографов-профилометров: Talysurf-5-120 фирмы «Taylor Hobson» (Великобритания) и Perthometer Concept фирмы «Mahr Federal» (Германия).

Для определения коэффициента отражения света от полированных поверхностей изделий на длине волны $\lambda = 530$ нм применялась специальная лазерная установка (ИАГ- Nd^{3+}), обеспечивающая точность измерений – 3 %.

В ходе экспериментальных исследований получены зависимости коэффициента отражения света от параметров шероховатости Ra , Rz , $Rmax$:

$$K = \exp(-67 \cdot Ra^2 + 2)$$

$$K = \exp(-18,2 \cdot Rz^2 + 2,2)$$

$$K = \exp(-1,5 \cdot Rmax^2 + 1,9)$$

Погрешность аппроксимации указанных функций составляет 10,1%, 7,2 % и 10,5 % соответственно. Коэффициент отражения света наилучшим образом коррелирует с параметром шероховатости Rz .

Таким образом, можно сделать вывод о целесообразности использования коэффициента отражения света для контроля качества полированных поверхностей изделий из неметаллических материалов, в особенности, природных и искусственных камней строительного и декоративного назначения.

Ключевые слова: контроль качества, полирование, шероховатость, коэффициент отражения, природные и искусственные камни.

ЕНЕРГЕТИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ЕЛЕКТРОБУРА

*Гладь І.В., Федорів М.Й., Галушак І.Д., Івано-Франківський національний
технічний університет нафти і газу, м. Івано-Франківськ, Україна*

Електробуріння нафтових і газових свердловин має суттєві переваги у порівнянні з бурінням турбобуром і ротором, головними з яких є жорстка механічна характеристика електробура (ЕЛБ), нечутливість до параметрів промивної рідини, відсутність втрат потужності на обертання колони бурильних труб, можливість опосередкованого контролю обертового моменту на долоті.

З метою забезпечення в реальному масштабі часу бурильника інформацією про процес активного буріння авторами розроблено експериментальний зразок віртуального приладу (ВП) для контролю енергетичних параметрів ЕЛБ (рис. 1).

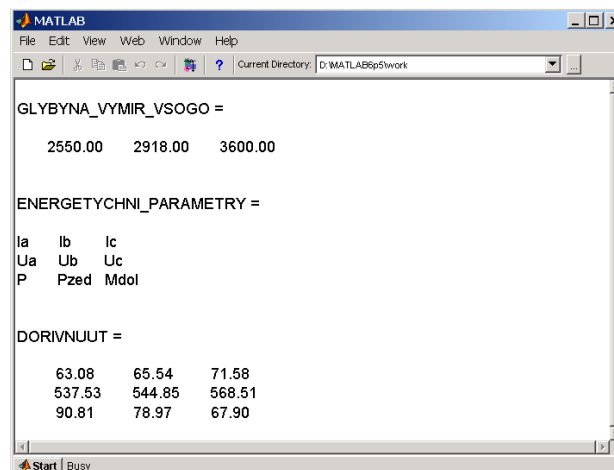


Рисунок 1 – Інтерфейс ВП контролю

ВП вимірює значення фазних струмів, напруг і активної потужності на затискачах ЕЛБ, а також значення обертового моменту на долоті з частотою оновлення показів екрану 1 Гц. ВП мають певні переваги у порівнянні з фізичними приладами, головною з яких є універсальність апаратного забезпечення.

В якості програмного забезпечення авторами застосовано математичний пакет Matlab 6p5, який уможливорює збирання і обробку даних в реальному часі та збереження результатів обчислень на жорсткому диску ЕОМ. В якості плат збирання даних застосовано дві апаратно синхронізовані звукові плати CREATIVE PCI 128.

Розроблений ВП впроваджено у Прикарпатському управлінні бурових робіт, що підвищило надійність та ефективність електробуріння свердловин.

Ключові слова: електробур, віртуальний прилад, плата збирання даних, звукова плата, енергетичні параметри.

УДК.681.586

КВАРЦОВИЙ ДИЛАТОМЕТР ДЛЯ ВИВЧЕННЯ СТРУКТУРНОЇ РЕЛАКСАЦІЇ СКЛОПОДІБНИХ МАТЕРІАЛІВ

Цигика В.В., Ужгородський національний університет, м. Ужгород, Україна

Властивості склоподібних матеріалів в значній мірі визначаються попередньою термообробкою. Одним із методів фіксації структурних змін в стеклах на мікрокристалічному рівні є вимірювання термічного розширення в інтервалі температур розм'якшення. Важливою вимогою до дилатометра в цьому випадку є мінімальний вимірний тиск на зразок. В даному повідомленні пропонується до розгляду конструкція дилатометра, придатного для таких вимірювань.

В даній конструкції застосовано метод виносного ємнісного датчика з початковим проміжком між пластинами $4 \cdot 10^{-4}$ м і ємністю ~ 10 пФ. Збільшення проміжку між пластинами плоского конденсатора на 1 мкм супроводжується зміною ємності на 0,02 пФ, що при чутливості вимірювача 10^{-3} пФ дає можливість фіксувати видовження $5 \cdot 10^{-8}$ м.

Дилатометрична комірка включає наступні основні вузли: тримач, кварцову ампулу, кварцовий шток, циліндричний електронагрівник, вимірний конденсатор, мікромметр. Зразок затискають між дном кварцової ампули і штоком пружиною мікромметра. Такий варіант розміщення зразка виключає вплив розширення кварцу на результат вимірювання величини лінійного термічного розширення зразка. Нижня обкладка конденсатора непорушно закріплена на штоку, верхня розміщена на пластині, яка вільно пересувається по вертикалі. Початкову ємність конденсатора встановлюють фіксацією рухомої пластини в момент дотику обклашок, розділених шаром діелектрика (сльода). Мікромметр з ціною поділки 1 мкм призначений для затискання зразка, фіксації моменту дотику обклашок конденсатора та градування кривих видовження зразка. Перевагами такої конструкції є простота, надійність, не критичність до форми і розмірів зразків, а недоліками – варіація величини початкової ємності та необхідність градування кривих видовження в процесі кожного вимірювання.

Зміну температури зразків здійснюють в режимі лінійного нагріву з різними швидкостями за допомогою прецизійного регулятора з ПІД законом регулювання. В якості джерела опорної напруги регулятора температури застосовують генератор лінійно змінної напруги із змінним часом розгортки, що дозволяє задавати потрібні швидкості нагріву. В процесі вимірювань одночасно записують залежності зміни температури від часу $T(t)$ та відносного видовження від температури $\Delta l/l = f(T)$.

Вимірне зусилля на зразок, яке визначається силою пружності стискаючої пружини і конструктивними особливостями комірки склало не більше 0,3 Н. Відносна похибка визначення величини коефіцієнта лінійного термічного розширення $\alpha = \Delta l/l_0 \cdot \Delta T$ твердих зразків не перевищувала 3%. В області температур інтервалу розм'якшення похибка у визначенні КЛТР сягала 7 – 10 %, що обумовлено скороченням температурного інтервалу ΔT до середини якого

відносилось значення α та впливом вимірної тиску на зразок. Слід зауважити, що порівняно велика похибка у визначенні КЛТР не є суттєвим недоліком даного дилатометра, основна функція якого – визначення характеристичних температур інтервалу склування: температури розм'якшення, температури початку деформації зразка, структурної температури, тощо.

Ключові слова: дилатометр, термічне розширення, склоподібні матеріали.

УДК 620.179.14

СТРУКТУРНАЯ СХЕМА ПРИЁМНИКА ДЛЯ РЕГИСТРАЦИИ СКАЧКОВ БАРКГАУЗЕНА

¹⁾Богун Н.А., ²⁾Погорелов А.А., ¹⁾Физико-технический институт, г. Днепропетровск, Украина; ²⁾Днепропетровский национальный университет, г. Днепропетровск, Украина

Метод, основанный на регистрации и анализе потока скачков Баркгаузена, в настоящее время является одним из перспективных методов магнитного неразрушающего контроля. Дальнейшее развитие этого метода связывают с расширением числа независимых информативных параметров, характеризующих потоков скачков Баркгаузена. Для поиска информативных параметров целесообразно измеряемый аналоговый сигнал преобразовать в цифровую последовательность и применить современные методы обработки и анализа числовых рядов. В связи с этим, в докладе рассматривается вопрос о разработке приёмника, который выполняет функцию усиления сигнала ЭДС измерительной катушки до уровня достаточного для работы интегрального АЦП.

Требования к приёмнику определяются энергетическими и спектральными характеристиками скачков Баркгаузена, а также параметрами АЦП. В докладе рассматривается усилитель, который обеспечивает усиление сигнала с коэффициентом 1000 в полосе частот от 0 до 300 кГц. Одно из важных требований к усилителю – это минимизация уровня собственных шумов приёмника. В такой постановке задача синтеза приёмника не рассматривалась.

Для создания приёмника предлагается использовать современные малошумящие высокочастотные операционные усилители (ОУ). Собственный шум операционного усилителя традиционно характеризуется нормированным ЭДС шума, приведенного ко входу усилителя W . В докладе обосновывается зависимость между среднеквадратичным напряжением шума σ , приведенного ко входу многокаскадного приёмника и значениями коэффициента усиления K и нормированной ЭДС шума W каскадов.

$$\sigma = \sqrt{W_1^2 \cdot F_1 + \frac{W_2^2 \cdot F_2}{K_1^2} + \dots + \frac{W_n^2 \cdot F_n}{K_1^2 \cdot K_2^2 \cdot \dots \cdot K_{n-1}^2}} \quad (1)$$

Особенностью использования ОУ является обратная зависимость между коэффициентом усиления и наибольшей частотой сигнала, для которой этот

коэффициент обеспечивается. В соответствии с этой особенностью и на основе анализа выражения (1) в докладе приводится рекомендация по построению структурной схемы приёмника.

В докладе приведены результаты экспериментальных исследований спроектированного приёмника.

В докладе приведены значения шумовых характеристик приёмника, которые можно получить на основе использования серийно выпускаемых ОУ.

Ключевые слова: скачки Баркгаузена, приёмник сигналов, операционный усилитель, шумовые характеристики.

УДК 621.311.1

ПІДВИЩЕННЯ НАДІЙНОСТІ І ТОЧНОСТІ КОНТРОЛЮ СТУПЕНЯ ЗАБРУДНЕНOSTІ ВИСОКОВОЛЬТНИХ ІЗОЛЯТОРІВ ПІД НАПРУГОЮ

*Серебренніков С.В., Сіріков О.І., Національний технічний університет, м. Кіровоград,
Україна*

Підвищення якості діагностики стану високовольтних ізоляторів та всебічний контроль за їхнім забрудненням є одним із основних заходів по підвищенню надійності електричних мереж, оскільки статистикою підтверджується, що практично 30 % всіх аварійних відключень відбувається за рахунок пошкодження або перекриття ізоляції.

Під час експлуатації високовольтні ізолятори повітряних ліній електропередач і підстанцій неминує забруднюються пилом, сажою, виносом промислових підприємств тощо. Забруднення поверхні ізоляторів призводить до погіршення їх ізолюючих властивостей і, як наслідок – зменшення поверхневих розрядних напруг з 3 ... 5 кВ/см до 0,5 ... 1 кВ/см. Процес забруднення носить складний в часі характер на який впливають сезонні зміни температури, вітру, близькість і тип джерел забруднення, засоленість та хімічний склад ґрунту тощо. Враховуючи, що більшість факторів, які впливають на забрудненість є випадковими, то і сам процес забруднення має імовірнісний характер. Тому, контроль ступеня забрудненості поверхні ізолятора є складною актуальною задачею.

Найбільш раціональним і природнім способом контролю ступеня забрудненості поверхні ізолятора під напругою є електромагнітний контроль за величиною струму витоку по його поверхні. Струм витоку є комплексним і має кілька складових. Об'ємна складова в процесі експлуатації практично не змінюється, поверхнева складова пов'язана із станом поверхні ізолятора і містить струм по поверхні незабрудненого ізолятора струм, обумовлений безпосередньо забрудненням та струм від сконденсованої вологи. Надмірне зволоження забруднюючого шару призводить до різкого зростання його провідності, що може призвести до хибного спрацювання приладів контролю забруднення. Нами запропоновано усувати вплив вологи шляхом вимірювання і компенсації ємнісної складової I_p поверхневого струму. При цьому активна

складова поверхневого струму I_a несе інформацію виключно щодо ступеня забрудненості. Тобто, контрольований струм витоку визначатиметься з виразу $I = I_a - kI_p$ де k – коефіцієнт, пропорційний мінералізації вологи. Для реалізації запропонованого принципу контролю розроблено прилад, що видає сигнал про критичний рівень забруднення.

Ключові слова: ступінь забруднення, електромагнітний контроль, струм витоку, перекриття ізоляції.

УДК 620.179.14

ФАЗОВА СЕЛЕКЦІЯ ПРИ БЕЗКОНТАКТНИХ ВИМІРЮВАННЯХ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ПРОВІДНОСТІ ВИХРОСТРУМОВИМ МЕТОДОМ

*Учанін В.М., Рибачук В.Г., Фізико-механічний інститут ім. Г. В. Карпенка НАНУ,
м. Львів, Україна*

Вимірювання питомої електричної провідності (ПЕП) вихрострумівим методом широко застосовуються при вирішенні задач вихрострумової структуроскопії немагнітних електропровідних матеріалів. Підґрунтям для використання вихрострумівих вимірювачів електропровідності в якості структуроскопів є наявність зв'язків між ПЕП та фізико-механічними характеристиками матеріалів. При здійсненні вихрострумівих вимірювань ПЕП завжди необхідно вирішувати дві основні проблеми: по-перше, забезпечити відстроювання від коливань зазору в заданих межах і, по-друге – забезпечити достатню локальність вимірювань, яка необхідна для можливості контролю деталей складної форми. Останнє пов'язано з тим, що на сигнал вихрострумівого перетворювача (ВСП) малого діаметру значно менше впливає кривизна поверхні.

Серед багатьох відомих підходів до побудови вихрострумівих вимірювачів ПЕП найкраще дозволяють вирішувати вказані проблеми прилади на основі накладних ВСП трансформаторного типу з використанням в якості інформативного параметру фази внесеної напруги. При цьому для забезпечення чутливості до змін ПЕП необхідно вибрати оптимальне значення узагальнюючого параметру $\beta = a \sqrt{\omega \mu_0 \sigma}$, де a – радіус еквівалентного витка обмотки ВСП, ω – кругова частота збуджуючого струму, μ_0 – магнітна стала, σ – значення ПЕП. В доповіді розглянуто особливості фазового способу вимірювання ПЕП, зокрема, різні можливі варіанти початкової компенсації напруги небалансу ВСП, які забезпечують відстроювання від впливу зазору. Проаналізовано особливості запропонованих способів динамічної компенсації та компенсації з підвищеною чутливістю до ПЕП. Розглянуто функціональні схеми фазових вихрострумівих вимірювачів ПЕП прямого перетворення і зрівноважувального частотного перетворення та проаналізовано особливості їх реалізації для різних способів компенсації напруги небалансу. Проаналізовано похибки фазових вимірювачів ПЕП, зокрема, специфічні інструментальні

похибки, характерні для приладів із слідкуючим та розгортуючим частотним зрівноважуванням. Розглянуто підходи до побудови фазовимірювальних вузлів вихрострумових вимірювачів ПЕП. У доповіді наведено приклади практичної реалізації фазових вихрострумових вимірювачів ПЕП, зокрема, розроблених у ФМІ ім. Г. В. Карпенка НАНУ ІЭ-ТМ, ІЭ 10-60, ІЭ 10-35, ІЭ-УЦ, а також останньої розробки – приладу ВЕ 4.01.

Ключові слова: вихрострумова структуроскопія, питома електрична провідність, вихрострумовий перетворювач, фаза.

УДК 681.325

ВИКОРИСТАННЯ ТЕРМОДИНАМІЧНИХ ЕФЕКТІВ ЯК ІНФОРМАТИВНИХ ПАРАМЕТРІВ ДЛЯ КОНТРОЛЮ РОЗВИТКУ МІКРОТРІЩИН У НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНИХ КОНСТРУКЦІЯХ

*Габльовська Н.Я., Івано-Франківський національний технічний університет
нафти і газу, м. Івано-Франківськ, Україна*

Пластична деформація у напружено - деформованих тілах є причиною зародження та розвитку мікрodefектів, які, за своєю суттю, визначаються енергетичними змінами в структурі металу, а це, у свою чергу, викликає зміну температури на поверхні. Причому ця зміна характеризується короткочасністю і, враховуючи навіть той факт, що тепловий процес є високоінерційним, значною динамічністю. Використання температури в якості інформативного параметру дозволяє визначити місце зародження мікрodefекту, а застосування моделі пластичного деформування дає можливість прогнозувати розвиток мікрodefекту в залежності від прикладеного навантаження та матеріалу, з якого виготовлена конструкція.

Вимірювання температури на поверхні тіла проводилось за допомогою спеціально розробленого ждя цієї мети вимірювача температури, в якості чутливого елемента якого використано напівпровідниковий давач, що характеризується багатофункціональністю, високою точністю і швидкодією.

Отримані результати експериментальних досліджень підтверджують, що при накопиченні напружень до певного граничного значення у металі зароджується мікрodefект. Встановлено, що інформативним параметром, який характеризує момент зародження мікротріщини, може бути стрибкоподібна зміна температури на поверхні зразка. Отримані мікрошліфи, також підтверджують, що процеси зародження та поширення мікротріщин мають фрактальну структуру, що володіє спектром дробових розмірностей.

За допомогою створеної моделі можна визначити параметри, що у повній мірі описують процес руйнування металу, а саме: критичний розмір мікротріщини, здатної до самоподібного поширення; максимальний розмір автотривалості зони передруйнування; коефіцієнт масштабу, що визначає тривалість поширення мікротріщини; “квант” енергії, що необхідна для самоподібного поширення мікротріщини. Ці результати дозволяють знайти

універсальний зв'язок між мікро- та макрохарактеристиками металів. А врахування універсальності і масштабної інваріантності критичних показників поблизу точок переходу системи до інших структурних рівнів дає можливість встановлення зв'язку між критеріями фрактальної механіки руйнувань для сплавів на однаковій основі.

Ключові слова: мікротріщина, фрактальна структура.

УДК 622.276.53: 621.67

ДІАГНОСТУВАННЯ СИСТЕМИ КОНТРОЛЮ ЗА ПРОЦЕСОМ БУРІННЯ СВЕРДЛОВИН НА НАФТУ І ГАЗ

*Когуч Я.Р., Сабат Н.В., Івано-Франківський національний технічний університет
нафти і газу, м. Івано-Франківськ, Україна*

Ефективність процесу буріння свердловин на нафту і газ визначається не тільки сучасною технологією даного процесу, оптимальним режимом, але контролем і автоматизацією технологічних параметрів.

Об'єктивність інформації про технологічні параметри процесу буріння визначається надійною роботою систем контролю і автоматичного керування цим процесом. Актуальним є питання діагностування системи контролю процесу буріння в реальному часі, визначальним при цьому є етап проектування, під час якого закладаються основи забезпечення надійності систем.

Для досягнення цієї мети авторами розроблений алгоритм діагностування системи автоматизованого контролю буримості гірських порід в процесі буріння свердловин на нафту і газ.

Запропонований алгоритм базується на діагностичних ознаках, що характеризують порушення нормальної роботи системи контролю, і технологічних параметрів і показників процесу буріння. Даний алгоритм реалізує безперервний метод діагностування системи автоматизованого контролю буримості гірських порід в процесі буріння свердловин на нафту і газ.

Діагностичними параметрами, що визначають експлуатаційну роботу системи автоматизованого контролю буримості гірських порід є осьове навантаження на долото, його частота обертання, тиск бурового розчину, показника вібраційного процесу.

Крім того, в алгоритм діагностування входять такі показники процесу буріння як механічна швидкість і час роботи долота.

Система автоматизованого контролю буримості гірських порід реалізована на сучасних вітчизняних засобах, які монтуються безпосередньо на буровій, і засобів обробки і представлення інформації, а також математичного і програмного забезпечення, які реалізують даний алгоритм.

На основі аналізу результатів діагностування необхідно розробити методи резервування, як один із основних засобів забезпечення заданого рівня надійності при недостатньо надійних деяких елементах системи.

Особливістю діагностування системи контролю є інформаційне резервування, яке полягає в тому, що при виникненні відмови одного із первинних вимірювальних перетворювачів це приведе до втрати технологічної інформації і спотворення алгоритму її функціонування.

Ключові слова: контроль, діагностування, система, первинний вимірювальний перетворювач, алгоритм.

УДК 621.317

СТАТИСТИЧНИЙ ТА ЧАСТОТНИЙ АНАЛІЗ СТРУМІВ У ДОВГИХ ЗАГЛИБЛЕНИХ ТРУБОПРОВОДАХ

*Стрілецький Ю.Й., Кононенко М.А., Івано-Франківський національний технічний
університет нафти і газу, м. Івано-Франківськ, Україна*

Для визначення місць пошкоджень ізоляційного покриття підземних трубопроводів важливо визначати перехідний опір ділянки покриття. Перехідний опір визначають за результатами вимірювань струму, що протікає по цьому трубопроводу. Струми можуть вже протікати по трубопроводу, або їх створюють спеціальними генераторами. При цьому важливо виділити сигнал власного генератора на тлі завад, якими в даному випадку є струми, що натікають в трубопровід вздовж його слідування.

При цьому важливо вибрати частоту генератора в діапазоні з найменшою енергією завади. Також важливо визначитися із законом розподілу для використання методів підвищення співвідношення сигнал/завада.

Для аналізу струму, що протікає по підземному трубопроводу вимірюється і фіксується змінне електромагнітне поле над трубопроводом. Проведений аналіз показав, що поблизу станцій катодного захисту переважаючими є частоти мережі живлення і її гармоніки. Крім того суттєво зростає вертикальна складова магнітного поля. В деяких випадках виникали сигнали на частотах 67, 74, 82 і 86 Гц. У випадку трифазного випрямляча в станціях катодного захисту переважали складові, що натікали у вигляді блукаючих струмів. Виявлено, що суттєвий вплив на сигнал мають потужні низькочастотні передаючі станції. При цьому сигнал має імпульсний характер.

Таким чином при дослідженні струму в підземному трубопроводі з використанням додаткового генератора треба використовувати модульований сигнал для виділення його на тлі завад. Вимірювання може здійснюватися шляхом накопичення при відомих параметрах модуляції і відповідній синхронізації із сигналом генератора.

Проведені дослідження показали, що досягнути більшої роздільної здатності при вимірюванні струму в заглиблених підземних трубопроводах можна використовуючи метод накопичення з часом інтегрування близько хвилини. Це дасть можливість збільшити віддаль при контролі від власного генератора і тим самим скоротити час на проведення контролю за рахунок зменшення комутації генератора до труби.

Ключові слова: дистанційне вимірювання струму, контроль суцільності ізоляційного покриття, спектр сигналу.

УДК 621.833:519.004

**АНАЛІЗ ДІАГНОСТИЧНИХ ОЗНАК ТРІЩИНОПОДІБНОГО
ПОШКОДЖЕННЯ ЕЛЕМЕНТІВ ТУРБОЛОПАТНИХ МАШИН НА
НЕСТАЦІОНАРНИХ РЕЖИМАХ ВІБРАЦІЙНОГО ЗБУРЕННЯ**

*Бурау Н.І., Сопілка Ю.В., Національний технічний університет “Київський політехнічний
інститут”, м. Київ, Україна*

В роботі проводиться аналіз діагностичної цінності ознак тріщино-подібного пошкодження в обертовому елементі (лопатці) газотурбінного авіаційного двигуна, які були визначені за результатами обробки діагностичної інформації на нестационарних режимах вібраційного збурення двигуна. Дана робота є складовою досліджень вібраційних та віброакустичних методів діагностики для їх використання в системі моніторингу технічного стану лопаток газотурбінних двигунів у процесі їх експлуатації. В якості діагностичної інформації використовуються сигнали, які сформовано в процесі модельних експериментів при нестационарних вібраційних збуреннях моделей робочих коліс двигуна за відсутності та наявності тріщиноподібного пошкодження. Нестационарні вібраційні збурення формувались відповідно до моделей вузькосмугових процесів з лінійним змінюванням частоти збурення таким чином, що моделювались режими прийомистості (швидке збільшення частоти), запуску (повільне збільшення частоти) та дроселювання (зменшення частоти).

Для обробки сформованих сигналів застосовано методи багатомірного спектрального аналізу, частотно-часового перетворення, вейвлет-перетворення з наступним визначенням безрозмірних амплітудних дискримінант для окремих елементів розкладання. За результатами обробки інформації було визначено діагностичні ознаки пошкодження, які для кожного з використаних методів обробки являють собою відносні величини і за всією сукупністю проведених модельних експериментів з урахуванням завад (відношення сигнал/шум в межах $10^{-1}, \dots, 10^4$) характеризуються математичним сподіванням та середнім квадратичним відхиленням. Для аналізу діагностичної цінності ознак вибрано критерії Фішера, максимуму відносного змінювання математичного сподівання ознаки при появі та розвитку пошкодження, мінімуму коефіцієнта варіацій ознаки. Вказані критерії охоплюють основні вимоги, яким повинні відповідати діагностичні ознаки, а саме: однозначність зв'язку діагностичної ознаки зі станом об'єкту діагностики; висока чутливість до зміни стану об'єкту; мінімальна дисперсія в межах одного класу технічного стану та максимальні зміни математичного сподівання при змінюванні класу.

В результаті проведеного аналізу для кожного з нестационарних режимів функціонування двигуна вибрано найбільш інформативні діагностичні ознаки,

за якими доцільно визначати технічний стан лопаток в процесі експлуатації двигуна.

Ключові слова: віброакустична діагностика, лопатки, пошкодження, діагностичні ознаки.

УДК 621.923

ЕЛІПСОМЕТРИЧНИЙ КОНТРОЛЬ ПОВЕРХОНЬ ДЕТАЛЕЙ З НЕМЕТАЛЕВИХ МАТЕРІАЛІВ

*Сідорко В.І., Філатов О.Ю., Філатов Ю.Д., Поперенко Л.В., ІНМ ім. В. М. Бакуля НАН
України, КНУ ім. Тараса Шевченка, м. Київ, Україна*

Якість полірованих поверхонь деталей з неметалевих матеріалів традиційно оцінюється за параметрами шорсткості Ra , Rz , $Rmax$, що визначаються за допомогою профілометрів-профілографів. Шорсткість поверхонь може також бути оцінена за допомогою високоточного оптичного методу еліпсометрії. Більш того, експериментальне дослідження змін у поверхневому шарі неметалевих матеріалів можна здійснити безпосередньо в процесі їх механічної обробки шляхом з'ясування впливу шорсткості оброблених поверхонь на еліпсометричні параметри відбитого від їх світла.

Шорсткість полірованих поверхонь оцінювалася параметрами Ra , Rz , $Rmax$, що вимірювались за допомогою профілографів-профілометрів: Talysurf-5-120 фірми «Taylor Hobson» (Великобританія) і Perthometer Concept фірми Mahr Federal (Німеччина).

Еліпсометричні параметри Δ і ψ поляризованого світла при відбиванні від поверхонь зразків з неметалевих матеріалів визначались за допомогою еліпсометра мод. «ЛЭФ-3М» при сталому значенні кута падіння лазерного променя ($\lambda=632,8$ нм) на поверхню зразка $\phi = 70^\circ$. Зразки із граніту Токівського та Янцівського родовищ готувались на різних стадіях їх фінішної обробки: тонкого і надтонкого алмазного шліфування і полірування.

Детальне вивчення процесу зміни шорсткості поверхонь зразків із неметалевих матеріалів (прозорих діелектриків) здійснювалось за допомогою шліфувально-полірувального пристрою, вбудованого в еліпсометр. Таке удосконалення еліпсометра мод. «ЛЭФ-3М» дозволило виконати еліпсометричні *in situ* дослідження поверхневого шару неметалевих матеріалів в процесі їх фінішної обробки.

В результаті досліджень встановлено, що різниця фаз коливань взаємноперпендикулярних компонент електричного вектора Δ є чутливою до кольору досліджуваного зразку. При будь-яких значеннях параметрів шорсткості Δ , характерна для граніту Янцівського родовища (сірого кольору) перевищує відповідне значення Δ , характерної для граніту Токівського родовища (червоно-коричневого кольору). Показана відповідність параметрів шорсткості та еліпсометричних параметрів поляризованого світла, відбитого від поверхонь деталей з неметалевих матеріалів, оброблених на різних операціях

механічної обробки. Встановлено, що параметр Δ зменшуються зі збільшенням шорсткості поверхні, а параметр Ψ (співвідношення амплітуд взаємноперпендикулярних компонент електричного вектора) зменшується при зменшенні шорсткості поверхні, маючи “стрибок” при $Rz = \frac{\lambda}{2}$.

Ключові слова: контроль якості, шорсткість, еліпсометричні параметри.

УДК 620.179

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ОДНОКРИСТАЛЬНЫХ МИКРОКОНТРОЛЛЕРОВ В УСТРОЙСТВАХ ИЗМЕРЕНИЯ ВРЕМЕННЫХ ИНТЕРВАЛОВ

Дзыгин Е.В., Петренко А.Н., Днепропетровский национальный университет, Физико-технический институт, г. Днепропетровск, Украина

Устройство измерения временных интервалов используется при реализации большинства методов неразрушающего контроля. В последнее время при разработке измерительных устройств широкое применение получили однокристалльные микроконтроллеры. Достоинством данных приборов является совокупность аналоговых и цифровых портов ввода-вывода и вычислительного процессора, конструктивно собранных в виде интегральной микросхемы. Это позволяет создавать компактные недорогие измерительные устройства, обладающие хорошими метрологическими характеристиками. Микроконтроллеры объективно ограничены по быстродействию и обладают ограниченными вычислительными возможностями. Цель данного доклада проанализировать потенциальную точность измерения временных интервалов при использовании однокристалльных микроконтроллеров, а также предложить способы реализации этой точности.

Потенциальная погрешность измерения временного интервала определяется тактовой частотой микроконтроллера f , в соответствии с выражением $\Delta t = k/f_t$ (здесь f_t определяется длительностью выполнения команды для данного семейства микроконтроллеров).

Использование аппаратных средств микроконтроллера, в частности встроенных таймеров, позволяет достичь потенциальной точности. Так как размер буфера таймера принципиально ограничен, то возможны различные варианты постановки и решения задачи измерения. В докладе рассматриваются следующие задачи.

Задача измерения коротких временных интервалов. Под короткими в данном контексте понимаются временные интервалы, для которых априори выполняется условие $\tau_{\text{инт}} \leq N \cdot \Delta t$ (здесь N размер буфера таймера). Для решения этой задачи предлагается использовать алгоритм, на основе прямого применения таймера.

Задача измерения временных интервалов, длительность которых априори не известна и в общем случае не удовлетворяет вышеприведенному условию. Для

решения этой задачи в докладе предложен адаптивный алгоритм на основе применения двух таймеров и встроенного делителя частоты.

В докладе приведены численные оценки потенциальной точности для различных микроконтроллеров, а также результаты реальных измерений, реализованных с помощью микроконтроллера семейства PIC.

Ключевые слова: измерение временных интервалов, микроконтроллер.

УДК [539.1.074:546.47'23'36'15]:616-073.7

ОСОБЕННОСТИ КОНСТРУКЦИИ ДЕТЕКТОРОВ НА ОСНОВЕ ПАРЫ «СЦИНТИЛЛЯТОР-ФОТОДИОД» ДЛЯ ДВУХЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЦИФРОВОЙ РАДИОГРАФИИ

*Рыжиков В., Ополонин А., Лисецкая Е., Даниленко В., Галкин С., Воронкин Е., Институт
сцинтилляционных материалов НАН Украины, г. Харьков, Украина*

Рентгеновское γ -излучение эффективно используется в цифровой радиографии. Она предназначена для распознавания пространственной структуры идентичных или химически отличающихся материалов.

В двухэнергетической радиографии эффективный атомный номер неизвестного материала можно восстановить по формуле, полученной из общей системы.

В технике это позволяет находить дефекты механических соединений, анализировать их состав. В медицине – диагностировать состояние костных и мягких тканей. В таможенном контроле – опознавать вредные и запрещенные вещества (взрывчатка, наркотики) и др.

Цель работы - теоретически и экспериментально показать, что методом двухэнергетической цифровой радиографии можно определить вещества, близкие по атомному номеру.

Такое улучшение диагностики позволит с более высокой вероятностью (до 80-90%) определять органику на фоне неорганики, как и выявление органики на фоне органики (взрывчатых веществ).

Модуль детектирования состоит из двух линеек типа сцинтиллятор-фотодиод (С-ФД), расположенных одна за другой. Ближняя к источнику рентгеновского излучения оптимизирована для детектирования низкоэнергетического (30-50кэВ) излучения, а расположенная за ней - для высокоэнергетического (80–120 кэВ) излучения. В качестве сцинтилляторов использовали ZnSe(Te) толщиной 0,5мм и CsI(Tl) толщиной 4мм соответственно.

В результате поиска резервов для повышения чувствительности и обнаружительной способности пары С-ФД, а также максимального использования особенностей неразрушающего контроля, мы можем различать вещества с близкими атомными номерами (отличие примерно 10-15 %).

Ключевые слова: сцинтиллятор, фотодиод, пространственное разрешение, цифровая двухэнергетическая радиография.

УДК 621.397

ИЕРАРХИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ОБРАБОТКИ ИЗОБРАЖЕНИЙ В ТЕХНИЧЕСКОЙ ДИАГНОСТИКЕ РЕЖУЩИХ ИНСТРУМЕНТОВ

*Деревянченко А.Г., Антощук С.Г., Билоненко П.Н., Одесский национальный
политехнический университет, г. Одесса, Украина*

В современных условиях гибкого автоматизированного производства в металлообрабатывающей промышленности обеспечение качественной обработки поверхностей режущими инструментами (РИ) во многом определяется наличием своевременной и достоверной информации о текущем состоянии режущей части РИ. В настоящее время существуют различные системы диагностики, среди которых весьма перспективными являются те, которые оснащены техническим зрением, т.е. оптическими датчиками и системой обработки. Цель визуального контроля состоит в выявлении параметров износа и определения геометрических размеров дефектов. При обработке изображений стараются извлечь из двумерного поля данных наиболее информативную часть. Для этого на изображении зоны износа должны быть выделены плоские одно- или многосвязные контура – границы зоны износа, границы текстурных зон и др. В результате обработки полученной контурной сегментации изображения получают комплекс параметров зоны износа (характерные признаки), которые затем используют для определения типа износа и принятия решения по диагностике. Существующие системы визуального контроля (СВК) не обладают достаточной помехоустойчивостью и не позволяют проводить "поэтапный" анализ дефектов на изображении, т.к. дефекты имеют разную физическую природу. Поэтому актуальна разработка СВК, использующих иерархические подходы при моделировании процесса обработки изображений РИ.

СВК выполняет следующие базовые информационные технологии (ИТ): предварительная обработка изображения, имеющая целью снижение влияния мультипликативной помехи и улучшение качества; выделение и анализ контуров; расчет признаков формы дефектов. Базовая ИТ выделения и анализа контуров является самой ответственной, определяющей эффективность СВК. В работе предлагается иерархический подход к выделению и анализу контуров с помощью сигнально-семантических методов: выделение внешнего контура зоны износа с использованием вейвлет-преобразования с низким уровнем разрешения, расчет диагностических признаков РИ и уточнение параметров износа путем обработки с более высоким разрешением. Применение иерархических моделей обработки изображений РИ позволило повысить помехоустойчивость и достоверность систем контроля и, следовательно, эффективность компьютерных систем технической диагностики режущих инструментов, и может найти применение во многих практически важных приложениях.

Ключевые слова: дефекты поверхности, режущие инструменты, контуры зон износа, системы визуального контроля, признаки формы дефектов.

УДК 621.39.1+681.142.2

РОЗПІЗНАВАННЯ НЕЙРОННОЮ МЕРЕЖЕЮ СТАНУ ЛОПАТОК ДВИГУНА НА СТАЦІОНАРНОМУ ТА НЕСТАЦІОНАРНИХ РЕЖИМАХ ВІБРАЦІЙНОГО ЗБУРЕННЯ

*Зажицький О.В., Бурау Н.І., Національний технічний університет “Київський
політехнічний інститут”, м. Київ, Україна*

Робота присвячена дослідженню ефективності застосування нейронних мереж для розпізнавання технічного стану лопаток авіаційних двигунів в процесі експлуатації на стаціонарному та нестаціонарних режимах вібраційного збурення. Розглядається задача двокласової діагностики (відсутність чи наявність малої тріщини в одній з лопаток робочого колеса двигуна) на основі множини двомірних векторів діагностичних ознак. Складові векторів діагностичних ознак для кожного з режимів вібраційного збурення являють собою відносні величини (безрозмірні амплітудні дискримінанти). Множини векторів діагностичних ознак отримано в результаті моделювання і цифрової обробки вібраційних процесів на виході бездефектного та дефектного робочого колеса при стаціонарних та нестаціонарних вібраційних збуреннях.

Для розпізнавання стану лопаток використано двошарову імовірнісну нейронну мережу, яка характеризується малим часом навчання, можливістю навчання мережі з нульовою похибкою, високою точністю розпізнавання лінійно нероздільних класів. Перший, радіально-базисний шар має 50 нейронів за кількістю навчальних векторів, а другий, що визначає ймовірність належності вхідного вектора до одного з двох класів (відсутність чи наявність дефекту), має два нейрона. Для класифікації використано по 50 навчальних та тестових векторів діагностичних ознак. В процесі класифікації навчальних векторів було проведено налагодження нейронної мережі (вибір параметру впливу імовірнісної нейронної мережі) для забезпечення нульової похибки навчання.

Ефективність розпізнавання стану лопаток оцінювалась за коефіцієнтом, що являє собою виражене у відсотках значення імовірності правильної класифікації тестових векторів діагностичних ознак. Для кожного з режимів вібраційного збурення проведено порівняльний аналіз точності розпізнавання стану лопаток робочого колеса за класичними статистичними методами та з використанням нейронної мережі. Проведено дослідження залежності коефіцієнта ефективності розпізнавання від параметру впливу нейронної мережі, в результаті чого для кожного з режимів двигуна визначено інтервал значень параметру впливу мережі, в якому імовірність правильної класифікації множини тестових векторів ознак є максимальною.

Ключові слова: віброакустична діагностика, класифікація стану, імовірнісна нейронна мережа, ефективність класифікації.

УДК 621.384

РАДІАЦІЙНЕ ЗНЕЗАРАЖЕННЯ ІНФІКОВАНИХ СТОКІВ

¹⁾Хрін Т.В., ²⁾Сахно В.І., ²⁾Сахно О.В., ¹⁾Національний технічний університет України “Київський політехнічний інститут”, м. Київ, Україна; ²⁾Інститут ядерних досліджень НАН України, м. Київ, Україна

Аналізується вплив на екологічний стан навколишнього середовища відходів лікувальних (медичних) закладів, диспансерів, підприємств фармацевтичної промисловості.

Досліджуються існуючі засоби знезараження та їх недоліки. Детально описано процес знезараження стічних вод, з використанням іонізуючого випромінювання. Описується оригінальна структура радіаційної установки з використанням дешевих низькоенергетичних прискорювачів. Розглянута установка відноситься до числа сучасних недорогих технічних засобів, побудованих на нових і більш ефективних принципах знешкодження інфекцій.

Запропонована установка за своєю вартістю доступна для впровадження в будь-які лікувальні заклади, які мають інфекційні відділення. Впровадження установок дозволить підвищити санітарно-гігієнічні умови виробництва, захистити зовнішнє середовище, забезпечити запобігання епідемії інфекційного походження серед населення.

Ключові слова: інфіковані стоки, тубдиспансер, знезараження, електрофізична установка, бактерицидна, бактеріостатична дії, радіаційна стерилізація.

УДК 53.082.79

СУЧАСНИЙ СТАН І ПЕРСПЕКТИВИ РОЗВИТКУ СИСТЕМ ВИМІРЮВАННЯ В РАДІАЦІЙНИХ МЕТОДАХ НЕРУЙНІВНОГО КОНТРОЛЮ

Хрін Т.В., Національний технічний університет України “Київський політехнічний інститут”, м. Київ, Україна

Наведено результати аналізу оптимальних галузей застосування радіаційних методів неруйнівного контролю.

Показано доцільність їх використання в машинобудуванні, авіабудуванні, медицині, сільському господарстві, тощо. Визначається перелік радіаційних факторів, що їх необхідно реєструвати в процесі здійснення різних методів неруйнівного контролю з залученням радіації. Здійснюється класифікація факторів за характеристиками призначення.

Розглядаються різні методи реєстрації випромінювання. Показано можливість рознести їх в 3 групи, що відповідають вимогам сучасної метрології – хімічні методи радіометрії, електричні методи вимірювань іонізуючих випромінювань, комп’ютеризовані системи для сучасної томографії.

Визначаються основні особливості цих методів і принципи їх використання в реальних процесах НК.

Наведено перелік і класифікацію технічних засобів для контролю за іонізуючим випромінюванням, які застосовуються в сучасних системах контролю за процесами, пов'язаними з застосуванням радіаційних методів НК. Характеристики найбільш широко поширених технічних засобів зведені в таблиці. Показано особливості застосування і метрології цих засобів.

Аналізується історія розвитку технічних засобів вимірювання радіації, в тому числі і в українських науково-технічних закладах. Наводиться перелік технічних засобів радіометрії, створених і вироблених в Україні. Описується внесок українських фахівців з радіаційного приладобудування в вирішення проблем ліквідації аварії на ЧАЕС.

Показано, що перспективою вдосконалення технічних засобів радіометрії є створення складних систем радіаційних вимірювань з використанням комп'ютерної обробки інформації.

Розглянуто типові для радіаційних вимірювань системи (стандартні системи КАМАК, ВЕКТОР тощо). Наводиться перелік деяких комп'ютерних засобів радіометрії для цільового призначення.

Обговорюються перспективні системи радіаційних вимірювань для сучасних технологічних установок, в тому числі і для контролю великих опромінюваних просторів з випромінюванням різної природи.

Ключові слова: система, вимірювання, радіаційні технології, неруйнівний контроль, іонізуючі випромінювання, радіація, метрологія, вимірювальні прилади, системи прийому і обробки інформації.

УДК 621.384

НЕРУЙНІВНИЙ КОНТРОЛЬ РІВНЯ СТРУКТУРНИХ ПОШКОДЖЕНЬ, СТВОРЕНИХ РАДІАЦІЄЮ У СВІТОДІОДНИХ GaP-СТРУКТУРАХ

Дубовий В.К., Петренко І.В., Каневський С.О., Хрін Т.В., Національний технічний університет України “Київський політехнічний інститут”, м. Київ, Україна; Інститут ядерних досліджень НАН України, м. Київ, Україна

Фосфідо-галієві р-п-переходи широко використовуються в оптоелектронній техніці як базові елементи для виготовлення світлодіодних матриць, оптронів, індикаторних, дозиметричних систем та ін. Виконуючи роль активних комірок у діагностичних та контролюючих пристроях, перебуваючи у зоні впливу радіаційних полів, вони змінюють свої параметри, погіршуючи цим самим стабільність технічних характеристик приладів, знищують експлуатаційний ресурс засобів контролю.

Проблема підвищення радіаційної стійкості електро-оптичних перетворювачів сигналів є актуальною не тільки в області неруйнівного контролю. Її розв'язання очікують також космічна галузь, атомна енергетика,

окремі напрямки сучасних ядерно-фізичних досліджень та прискорювальної техніки.

У поданому повідомленні будуть приведені результати досліджень впливу пучків проникаючої радіації на електрофізичні та випромінюючі властивості фосфідо-галієвих р-п-переходів та запропонований метод відбракування деградованих зразків, а також технічно недосконалих виробів від придатних до застосування елементів. В основі методу діагностики покладено вимірювання електричних параметрів як р-п-переходів виготовлених на основі GaP, так і на базі твердих розчинів GaP-GaAs.

Розроблений комплекс працює в автоматичному режимі, вимірювання здійснюються та обробляються комп'ютером. Аналіз одержаних результатів дає можливість зробити оцінки глибин залягання рівнів пасток носіїв струму, відповідальних за деградацію свічення, визначити області нестабільності введених радіаційних дефектів, виявити механізми деградаційних процесів, які протікають при опроміненні.

УДК 621.384.8

ДВОКАМЕРНЕ ДЖЕРЕЛО ІОНІВ ДЛЯ МАС-СПЕКТРОМЕТРИЧНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ ЗБУДЖЕНИХ МЕТАСТАБІЛЬНИХ СТАНІВ АТОМІВ ЛУЖНИХ МЕТАЛІВ

Славик В.М., Ужгородський національний університет, м. Ужгород, Україна

Двокамерне джерело іонів – це джерело з просторовим розподілом області збудження атомів у метастабільні автоіонізаційні стани (перша камера) і області їх автоіонізації (друга камера). Пучок нейтральних атомів одержується шляхом ефузії пари із гарячої вузької ($\sim 0,1$ мм.) щілини печі і проходить в першу камеру, де перетинається пучком електронів регульованої енергії. Утворені збуджені атоми попадають в другу камеру, де авто іонізуються або взаємодіють з іншими частинками. Заряджені частинки, утворені в першій камері, витягуються із пучка атомів поперечним електричним полем напруженістю $\sim 10^4$ В/см і невеликим гальмівним полем (20-60 В), прикладеним між камерами.

Двокамерне джерело іонів для установки з електричним монопольним аналізатором мас монтується на плоскій основі перед вхідною в мас-аналізатор щілиною. Розміри першої і другої камер 3x10x10 і 5x8x8 мм відповідно. Віддаль між камерами складає < 10 мм.

Застосування для реєстрації іонів вторинного електронного помножувача (ВЕП) веде до накладання обмежень на розташування джерела іонів, мас-аналізатора і ВЕП. Піч і перша камера розташовуються під кутом 90° до осі аналізатора, а ВЕП зміщується з осі. Дана схема приводить до суттєвого (на 2-3 порядки) збільшення відношення сигнал/шум.

Описане двокамерне джерело іонів може використовуватись також разом із електростатичним селектором для аналізу енергетичного спектру електронів, що утворюються в результаті автоіонізації метастабільних атомів разом з іонами.

З допомогою описаного двокамерного джерела іонів нами досліджувались процеси іонізації Пенінга і асоціативної іонізації, які відбуваються при взаємодії довгоживучих збуджених атомів лужних металів з незбудженими атомами і молекулами мас-спектрометричним методом. В поєднанні з циліндричним 127^0 селектором одержані також енергетичні спектри електронів, що утворюються в результаті як автоіонізації атомів калію в метастабільних станах, так і при їх взаємодії з атомами ксенона.

Ключове слово: джерело іонів, мас-аналізатор, автоіонізація, метастабільні атоми, лужні метали.

УДК 681.121

СИСТЕМА ОБЧИСЛЕННЯ БАЗОВИХ ВЕЛИЧИН ПРИ ДІАГНОСТУВАННІ ГАЗОПЕРЕКАЧУВАЛЬНИХ АГРЕГАТІВ

Горбійчук М.І., Скріпка О.А., Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, м. Івано-Франківськ, Україна

Підвищення надійності експлуатації газоперекачувальних агрегатів (ГПА) на

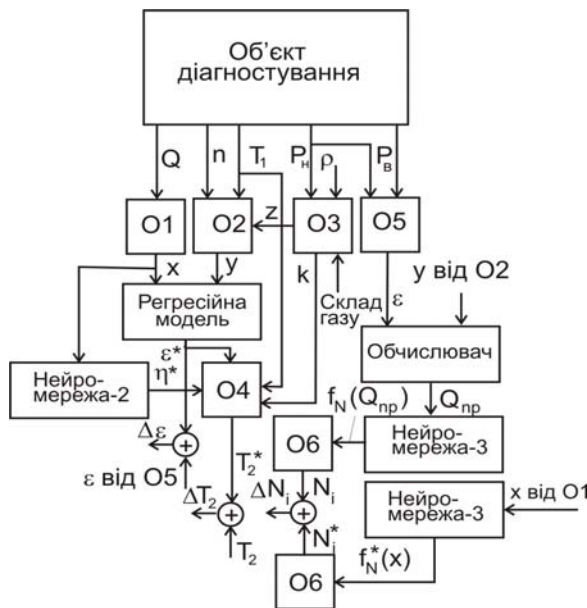


Рисунок 1 – Функціональна схема пристрою формування діагностичних ознак

компресорних станціях (КС) є однією з найважливіших задач у забезпеченні ефективної роботи газотранспортної системи, розв'язок якої можна здійснити шляхом реальної оцінки технічного стану об'єкту, які отримують в процесі технічної діагностики.

Сучасні ГПА оснащені інформаційно-вимірювальними системами, які, серед інших, вимірюють об'ємну витрату газу Q , температуру газу на вході T_1 і на виході T_2 нагнітача, число оборотів ротора n , тиск на вході в нагнітач P_1 та на виході із нагнітача P_2 . В такому разі можна обчислити такі базові показники як ступінь стиску газу ε^* , температуру T_2^* та внутрішню потужність N_i^* .

На рис. 1 показана функціональна схема формування діагностичних ознак. Вона складається із чотирьох обчислювачів O1, O2, O3 і O4 та двох узагальнених регресійних нейромереж – нейромережа-1 та нейромережа-2. На вхід обчислювачів O1 і O2 поступають

значення технологічних параметрів Q , n і T_1 , де за формулами $x = \frac{Qn_0}{n}$ і

$$y = \frac{n}{n_0} \sqrt{\frac{z_0 R_0 T_0}{z R T}}, \text{ де } z - \text{ коефіцієнт стисливості газу; } R - \text{ газова постійна,}$$

обчислюються значення x і y . Індекс "ноль" визначає певні опорні значення технологічних параметрів. Оскільки в формулу для обчислення y входять величина z , то для обчислення цієї величини служить обчислювач ОЗ, де крім z , обчислюється і показник адіабати k . На вхід обчислювача ОЗ подаються такі величини, як тиск на вході в нагнітач P_H , густина газу ρ приведена до стандартних умов та склад газу. Для обчислення базового значення політропної потужності N_i^* також використовується "Нейромережа-3", але на її вхід вже подається величина x від обчислювача О1. Діагностичні ознаки технічного стану нагнітача формуються на основі інформації про ε^* , T_2^* , N_i^* , ε , T_2 та N_i як відносна зміна технологічних параметрів ε , T_2 і N_i .

Ключові слова: газоперекачувальні агрегати, базові величини, діагностика, функціональна схема.

УДК 620.179.143

ЦИФРОВОЙ ВИХРЕТОКОВЫЙ ДЕФЕКТОСКОП ДЛЯ КОНТРОЛЯ ТРУБ

Мирошников В.В., Клочко Н.А., Сентяй Р.Н., ВНУ им. В.Даля, г. Луганск, Украина

При вихретоковом контроле труб с помощью проходного преобразователя сложности начинаются при настройке дефектоскопа. Необходимо правильно выбрать ток подмагничивания, согласовать амплитуду и фазу информационного сигнала и установить порог срабатывания исполнительных устройств. Автоматическая система настройки позволяет существенно упростить эту процедуру. Однако остается задача поддержания выбранного режима настройки. При аналоговой системе обработки выходного сигнала преобразователя эта задача решается путем подбора стабильных элементов схемы и выбранным схемным решением. Цифровая система обработки сигнала позволяет запоминать параметры настройки, что обеспечивает их неизменное значение в течении всего времени работы дефектоскопа. Несмотря на принимаемые меры стабилизации параметров настройки, соотношение величины сигнал/шум постоянно меняется в силу изменения электрических и магнитных свойств контролируемого материала. А если учесть, что настройка проводится по контрольному образцу, у которого эти параметры могут существенно отличаться от параметров рабочего материала, то вся проведенная настройка оказывается неэффективной, исправить её можно понизив порог срабатывания, что приводит к перебраковке контролируемых объектов. Учитывая вышеприведенные соображения,

разработан цифровой вихретоковый дефектоскоп с автоматической системой поддержания заданного соотношения сигнал/шум. В отличие от известных конструкций с «плавающим» порогом в дефектоскопе используется метод корректировки амплитуды и фазы информационного сигнала в зависимости от измерения характеристик материала объекта контроля.

Для реализации этой функции в вихретоковый преобразователь вводится дополнительная обмотка, которая наматывается поверх дифференциальных обмоток и длина ее больше базы дифференциального преобразователя. Таким образом, она становится практически нечувствительной к локальным дефектам. Однако наводимая в ней ЭДС напрямую зависит от свойств контролируемого материала. Выходной сигнал этой обмотки после оцифровки поступает в микропроцессорную систему, также как сигналы дифференциального, абсолютного канала и сигнал с обмотки возбуждения. Алгоритм микропроцессорной системы построен таким образом, что в течении времени настройки, которое составляет 2-3 секунды, на бездефектном участке контролируемого металла вычисляется усредненное значение амплитуды и фазы сигналов дифференциального и абсолютного каналов и определяются эти параметры от дополнительной обмотки. Затем вычисляются коэффициенты соответствия по амплитуде и фазе измерительных и дополнительной обмоток. В дальнейшем при работе дефектоскопа коэффициенты соотношения поддерживаются автоматически при изменении выходного сигнала независимо от изменения свойств контролируемого материала. Точность поддержания данных коэффициентов определяет стабильности работы дефектоскопа и обеспечивает однозначное определение дефекта при заданном пороге срабатывания.

Поддержанию дефектоскопа в рабочем режиме длительное время способствует также система тестовой проверки. Она заключается в подаче импульса тока в тестовую обмотку, которая намотана поверх одной из обмоток дифференциального преобразователя. Величина тока импульса выбирается такой, чтобы поле, создаваемое этой обмоткой, формировало в преобразователе такой же сигнал, как и от дефекта. Периодичность тестирования измерительного тракта дефектоскопа позволяет контролировать его работоспособность и осуществляет проверку настройки без использования контрольного образца, что не требует остановки стана.

Ключевые слова: вихретоковый преобразователь, система тестовой проверки, метод корректировки амплитуды и фазы.

УДК 620.179.143

ФЕРРОЗОНДОВЫЙ МАГНИТНЫЙ КОНТРОЛЬ СВАРНЫХ ШВОВ ТРУБ

Швец С.Н., Победа Т.В., Костюкова Е.П., ВНУ им. В. Даля, г. Луганск, Украина

Контроль качества сварного шва осложняется тем, что область шва является магнитнеоднородной. Сварной шов можно представить как две симметричные области, в которых ось симметрии проходит по центру шва. Тогда в каждой

области можно определить четыре зоны: непосредственно сварного шва, пришовная зона, термического воздействия и исходного металла. Каждая из указанных зон имеют свою магнитную проницаемость, поэтому для достижения эффективного контроля всего сварного шва необходимо для каждой зоны подобрать свой режим намагничивания. Учитывая небольшие размеры указанных зон, в качестве источника магнитного поля можно использовать постоянные магниты. Величина поля подмагничивания изменяется путем подбора расстояния от поверхности контроля до постоянного магнита (ПМ). В качестве ПМ используются магниты типа ниобий-железо-бор, в торцах которых расположены феррозонды. Таким образом, расчет магнитной системы сводится к определению напряженности магнитного поля в сердечниках феррозонда.

При построении модели принимаем следующие допущения: вектор намагниченности $\vec{M}$ постоянен во всем объеме ПМ. Магнитный материал области сварного шва не насыщен и его проницаемость равна $\mu = \infty$, а поверхность шва считается эквипотенциальной. Предлагаемая модель базируется на основе уравнения Фредгольма 1-го рода.

В линейной изотропной среде потенциал магнитного поля эквипотенциальной поверхности равен

$$\varphi(Q) = \frac{1}{4\pi\mu_0} \int \frac{\sigma(P)}{|\vec{r}_Q - \vec{r}_P|} dS \quad (1)$$

где P – точка поверхности сварного шва, Q – точка наблюдения, σ – плотность магнитных зарядов.

Из теории потенциала известно, что функция потенциала непрерывна при переходе точки Q на эквипотенциальную поверхность S , тогда из (1) следует интегральное уравнение $\overline{A} \cdot \overline{\sigma} = \overline{\varphi}$ (2), где $A = \frac{1}{2\pi\mu_0} \int_S \frac{1}{|\vec{r}_Q - \vec{r}_P|} dS$ –

интегральный оператор. Так как в магнитной системе присутствует ПМ, который является источником магнитного поля с известным распределением плотности магнитных зарядов, то уравнение (2) запишется $A\sigma = \varphi - \varphi_{ПМ}$ (3).

Поскольку потенциал поверхности сварного шва не известен, выбираем одно уравнение, соответствующее точке наблюдения Q_N . Из всех уравнений записанных для зон сварного шва вычитается почленно уравнение, соответствующее точке Q_N . Тогда значение потенциала сварного шва из (3) исключается, а на место уравнения для Q_N ставится условие о суммарном заряде на поверхности шва $\int_S \sigma dS = 0$ (4). Поскольку уравнения (2) и (3) являются

сингулярными, при их численном решении применяется метод модифицированных квадратур и уравнение (4) превращается в систему линейных уравнений $[A] \cdot [\sigma] = [\varphi_{ПМ}]$. Для составления этой системы уравнений поверхность сварного шва и ПМ делятся на N и M прямоугольных элементарных площадок ΔS_i , предполагается, что на $\Delta S_i = const$, $i = (\overline{1, N})$. Так как

в качестве магниточувствительного элемента используется феррозонд, то определяется магнитный поток, по которому можно найти индукцию и напряженность поля.

Согласно теореме о взаимности магнитный поток в ферромагнитном сердечнике равен

$$\Phi = \frac{\mu_0}{i\omega} \int_Q \bar{H}_\Phi(P) \bar{M}(P) dV; \quad P \in Q_{ПМ} \cup Q_k; \quad Q \in Q_{ПМ} \cup Q_k,$$

где $\bar{H}_\Phi(P)$ – вектор напряженности магнитного поля, создаваемого сердечником преобразователя, на котором имеется катушка с числом витков ω и током i ; M – намагниченность ПМ и ферромагнитного материала сварного шва.

Ключевые слова: сварной шов, магнитнеоднородная среда, постоянный магнит, сингулярные уравнения, феррозонд.