

## **ДЕЯКІ АКТУАЛЬНІ НАПРЯМКИ НЕРУЙНУЮЧОГО КОНТРОЛЮ ВЛАСТИВОСТЕЙ МАТЕРІАЛІВ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИМИ МЕТОДАМИ**

Безотосний В.Ф., к.т.н., доц., Власенко Е.В., к.т.н., доц., Козлов В.В., к.т.н., доц., Афанасьєва І.О.,  
Набокова О.В.

Запорозький національний технічний університет

Україна, 69063, Запоріжжя, вул. Жуковського, 64, ЗНТУ, кафедра "Теоретична та загальна електротехніка"  
тел. (061)228-16-12

Смельянов В.Л.

Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут"

Україна, 61002, Харків, вул. Фрунзе, 21, НТУ "ХПІ", кафедра "Електричні апарати"  
тел. (057)707-68-64

*В статті розглядаються питання контролю неелектричних та електричних параметрів матеріалів електромагнітними методами. Пропонується система автоматичного неруйнуючого контролю механічних напружень в деталях радіоелектронної апаратури.*

*У статті розглянуто питання контролю неелектричних та електричних параметрів матеріалів електромагнітними методами. Пропонується система неруйнуючого автоматичного контролю механічних напружень у деталях радіоелектронної апаратури.*

Одним з напрямків наукової роботи кафедри "Теоретична та загальна електротехніка" Запорізького національного технічного університету (ЗНТУ) є питання контролю неелектричних та електричних параметрів матеріалів електромагнітними методами. Результати деяких з них наведені нижче.

### **РОЗРАХУНОК ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ ПРИ ОДНОЧАСНОМУ НАМАГНІЧУВАННІ ДЕКІЛЬКОХ ФЕРОМАГНІТНИХ МАТЕРІАЛІВ РІЗНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ**

Електромагнітні перетворювачі знайшли широке застосування для контролю електромагнітних властивостей матеріалів, їхньої структури, товщини покриттів та інше. Особливий інтерес у цьому плані представляє розгляд перетворювачів зі спрямованим магнітним потоком, які дозволяють одержати однорідний магнітний потік в області контролю досліджуваного матеріалу, що значно підвищує точність контролю. Вірогідність розрахунку параметрів подібних перетворювачів значною мірою визначається точністю розрахунку магнітного опору намагніченої ділянки матеріалу. Відомі формули для розрахунку магнітного опору матеріалів отримані для випадку намагнічування матеріалів з однорідними електромагнітними властивостями двохполюсними перетворювачами. Однак, часто необхідно розраховувати перетворювачі при намагнічуванні двошарових феромагнітних матеріалів.

Типова конструкція перетворювача, яка застосовується для намагнічування двошарових матеріалів, виконана із трьох магнітопроводів з розмішеними на них обмотками. Таке конструктивне виконання перетворювача дозволяє одержати однорідний магнітний потік в зоні контролю матеріалу та через магнітопровід з вимірювальною обмоткою.

Для розрахунку вихідного сигналу перетворювача необхідно насамперед визначити магнітний опір

двошарового середовища, тому що магнітні опори магнітопроводу й зазору можуть бути визначені за відомими співвідношеннями.

При розрахунку магнітного опору двошарового матеріалу допущено, що:

напруженість магнітного поля не змінюється по поверхні контрольованого матеріалу уздовж активної бази перетворювача, а змінюється тільки по глибині матеріалу;

потоком, що проходить в області матеріалу, за межами об'єму між полюсами середнього магнітопроводу можна зневажити.

Для обґрунтування прийнятих допущень було проведено експеримент з використанням голчастого датчика, що виконано із двох електродів з відстанню між ними на порядок менш ніж активна база перетворювача. Голчастий датчик переміщався по поверхні матеріалу уздовж активної бази перетворювача. Як контрольований матеріал використалася пластина розміром 20×20×0,5 см, що виконана зі сталі Ст.3. Результати експерименту показали, що при будь-якій силі й частоті струму, вихідний сигнал з голчастого датчика вздовж активної бази перетворювача змінюється не більш ніж на 4%.

Експериментами також доказано, що при проникненні електромагнітної хвилі в матеріал феромагнітного покриття відбувається зсув за фазою між прямою та відбитою хвилями, при цьому модуль амплітуди прямої хвилі на декілька порядків більше модуля амплітуди відбитої хвилі, що дозволило визначити постійні інтегрування для всіх реальних феромагнітних покриттів.

Проведеними дослідженнями одержані співвідношення глибини проникнення електромагнітного поля в перший та другий феромагнітні шари та їх магнітних опорів. Подальший розрахунок накладних електромагнітних перетворювачів з локалізованим

магнітним потоком для двошарових феромагнітних матеріалів виконується за методикам, що розроблені авторами раніш.

#### ЕКСПРЕС-КОНТРОЛЬ МЕХАНІЧНИХ НАПРУГ В ДЕТАЛЯХ ТА КОНСТРУКЦІЯХ РЕА ЗА ДОПОМОГОЮ АЦП ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ

Одним з завдань при неруйнуючому контролі, наприклад радіотехнічних феромагнітних матеріалів і конструкцій, є визначення механічних напруг, виникнення яких обумовлене дією експлуатаційних і технологічних факторів. При контролі механічних напруг у відповідальних вузлах і деталях складних радіоелектронних систем, де кількість контрольованих точок десятки і сотні, а контроль повинен бути діагностичним й оперативним, необхідно використання спеціалізованих або універсальних ЕОМ. В основу побудови автоматичної системи контролю (АСК) механічних напруг у *m*-точках будь-якої конструкції РЕА, чи бортових конструкціях різних об'єктів, може бути покладена розроблена блок-схема. Функціональне призначення електронного комутатора (ЕК) і аналого-цифрового перетворювача (АЦП) не вимагає пояснень. Кожний вихідний сигнал АЦП має цифровий код, що відповідає значенню контрольованого перетворювачем параметру. Сигнали з виходу АЦП надходять в арифметичний пристрій (АП), у якому відбувається порівняння з верхнім і нижнім припустимими значеннями кожного параметру. Інформація про припустимі межі зберігається в довгостроковому запам'ятовувальному пристрої (ДЗП) ЕОМ. Пристрій керування (ПК) служить для забезпечення синхронності роботи ЕК, АЦП, АП й ДЗП. Результат порівняння надходить на вхід логічного пристрою (ЛП). Якщо контрольований параметр перебуває в полі допуску, він записується в осередок оперативної пам'яті ЕОМ, а також може бути записаний пристроєм, що реєструє (РП). При виході контрольованого параметра за межі поля допуску, сигнал з ЛП подається в пристрій керування, що конкретизує номер контрольної точки виміру й значення відхилення механічної напруги від припустимого. При необхідності інформація про параметр, що вийшов за поле допуску, з ЛП подається в підсистему діагностичного контролю (ПДК), що встановлює причину відхилення.

Одними з основних елементів будь-якої автоматизованої системи контролю є чутливі елементи-перетворювачі, від чутливості й надійності яких у першу чергу залежить ефективність роботи АСК. З широкого класу перетворювачів, які можуть бути використані в АСК, варто віддавати перевагу магнітопружним (МП), які відрізняються винятковою надійністю й потужним вихідним сигналом. Застосування МП пов'язане з безконтактним способом визначення механічних напруг у напружених елементах конструкцій, а це дозволяє розглядати АСК з більш широкими функціональними можливостями.

Застосування різного роду компенсаційних схем для усунення початкового сигналу обмежує швидкість й можливості АСК, тому що потрібні додаткові регульовальні операції при установці АСК із об'єкта на об'єкт. У розглянутому плані більше ефективні

МП, виконані за мостовою схемою, які дозволяють відразу одержувати корисну інформацію без накладення початкового сигналу й з мінімальним впливом коливань навколишньої температури на опір обмоток і сполучних проводів. При відсутності механічних напруг в області контролю у вимірювальній обмотці електрорушійна сила (ЕРС) не наводиться. Механічні напруги, що виникають при впливі на матеріал зусиль, порушують симетрію магнітного поля щодо вимірювального магнітопроводу та призводять до відгалуження частини потоку. Узгодження сигналу МП із блоком цифрового АЦП може здійснюватися як на змінному, так і на постійному струмах. Схеми узгодження на змінному струмі простіше, однак узгодження при цьому має ряд істотних недоліків у порівнянні з методом узгодження на постійному струмі. Фазове зрушення сигналу з перетворювача стосовно напруги порушення вимагає установки у вихідні кола кожного перетворювача фазо-зсувних пристроїв, і індивідуального настроювання їх при кожній зміні точок контролю механічних напруг у конструкціях. До того ж ці пристрої піддаються значним температурним похибкам. Більшість промислових аналого-цифрових перетворювачів призначені для перетворення постійної-аналогової напруги, тому між блоком ЕК і блоком АЦП є кільцевий демодулятор (КД).

Розроблена система автоматичного контролю механічних напруг у деталях та вузлах РЕА і бортових конструкцій може бути успішно використана для контролю статистичних та динамічних механічних напруг у діапазоні (0...4).107 Н/м<sup>2</sup> при лінійній залежності вихідного сигналу перетворювача від їх величини.

#### СПОСІБ КОМПЕНСАЦІЇ ПОЧАТКОВОГО СИГНАЛУ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ

При контролі електромагнітних властивостей радіотехнічних феромагнітних матеріалів і механічних впливів на елементи й вузли РЕА використовують електромагнітні диференціальні перетворювачі. При цьому актуальними завданнями є розробка генераторів для створення пульсуючого магнітного потоку в магнітопроводах перетворювачів, а також компенсація початкової електрорушійної сили (ЕРС) у вимірювальній обмотці. При живленні електромагнітних перетворювачів від промислової мережі стабільність напруги забезпечується застосуванням ферорезонансних стабілізаторів, осердя яких працюють у режимі насичення, при цьому форма кривої живильного струму змінюється під впливом третьої гармонійної складової.

З метою підвищення чутливості й точності вимірів електромагнітні перетворювачі повинні забезпечувати мінімальне значення початкової вихідної напруги. Через недосконалість технології виготовлення й розходження в хімічних складах матеріалів магнітопроводів перетворювачів забезпечити зазначену вимогу практично неможливо. Для компенсації початкового сигналу, тобто розбалансу між ЕРС вимірювальних обмоток, раціонально використати фазове зрушення між основними гармонійними складовими, що

викликають цей розбаланс. Компенсація досягається плавною зміною фази між вихідними імпульсами.

В ідеальному випадку повинні виконуватися умови:  $E_m' \sim E_m''$  і  $\varphi' = \varphi'' + 180^\circ$ . Реально зсув фаз досягає декількох десятків хвилин і навіть декількох градусів. Розроблений генератор, призначений для електромагнітних перетворювачів, дозволяє не тільки плавно змінювати частоту живлення, але й значно зменшувати початкову вихідну напругу перетворювача через зміну фазового зсуву вхідних імпульсів. До його складу входять генератор, що формує прямокутні імпульси невеликої тривалості (100 мкс), фазозсувний пристрій, блок узгодження, підсилювачі потужності. Для реалізації вузлів генератора застосовані сучасні схемні рішення. Виняток становить лише генератор, що задає частоту  $f$ , у якому формуються сигнали пилоподібної форми. Частота проходження імпульсів на виході генератора визначається швидкістю заряджання конденсатора до опорної напруги компаратора. Швидкість заряджання конденсатора визначається значенням керуючої напруги, що задається змінним резистором. Напруга змінюється за лінійним законом, тому що заряджання відбувається при незмінному за силою струмі. Прямокутний імпульс на виході одновібратора формується під час зворотного ходу пилоподібного сигналу. Параметри кіл підбираються таким чином, щоб тривалість прямокутного імпульсу на виході одновібратора була приблизно 250...300 мкс. Зсув за фазою вихідних імпульсів здійснюється за рахунок порівняння пилоподібної напруги з напругою керування.

Генератор з фазовим зсувом вихідних імпульсів був застосований авторами для спільної роботи з електромагнітними перетворювачами виміру зусиль та товщини покриттів і може бути рекомендований для роботи з будь-якими електромагнітними перетворювачами диференційно-трансформаторного типу. Протягом тривалого періоду експлуатації генератор показав високу надійність і стабільність роботи.

#### НЕРУЙНУЮЧИЙ ЕКСПРЕС-КОНТРОЛЬ ТВЕРДОСТІ ДЕТАЛЕЙ ПІСЛЯ ТЕРМІЧНОЇ ОБРОБКИ

Неруйнуючі магнітні методи визначення твердості деталей відомі. Однак для деталей з незначною робочою поверхнею відомі методи контролю дають значні похибки вимірів, викликані впливом фактора, що розмагнічує, геометрії деталі та впливом магнітних полів, що поширюються в неробочих областях. Запропоновано використовувати для виміру твердості електромагнітні перетворювачі накладного типу з локалізованим магнітним потоком, при цьому точність виміру істотно підвищується. Перетворювач має П-образний магнітопровід, що виконано з трьох паралельно розташованих частин, обмотку намагнічування, яка намотана на осердя всіх трьох частин магнітопроводу, і вимірювальну, яка намотана тільки на середню його частину. Магнітний потік, створений обмоткою замикається через досліджувану деталь, а результати вимірів фіксуються вимірювальним приладом. Вплив магнітних потоків у магнітопроводі один на одного виключається,

тому що його середня частина відділена від крайніх електропровідними прокладками.

Контроль твердості ведеться в об'ємі досліджуваного об'єкта, намагніченого магнітним потоком, що проходить по середній частині магнітопроводу. Наявність коригувальних бічних потоків виключає можливість відгалуження вимірювального потоку в неробочі області деталі, що значно підвищує точність вимірів.

Магнітопровід був виготовлений з листової електротехнічної сталі типу Е330. Перетин магнітопроводу 5x10 мм, ширина активної бази 15 мм, кількість витків 100x2 і 500 для обмоток намагнічування й вимірювальної відповідно (провід ПЕВ-2 Ø0,15 мм).

Отримана математична залежність величини вихідного сигналу перетворювача від електромагнітних властивостей контрольованого матеріалу при локальному намагнічуванні сплавів РЕА (сталь 47 та інші), також отримані експериментальні залежності сигналу від твердості після термічної обробки згідно технології (активна поверхня виробу 25x30 мм).

Дослідження показали, що придатним виробам, твердість яких повинна лежати в діапазоні 53-58 одиниць відповідає значення вихідного сигналу від 70 до 150 мкА (режим термічної обробки: нагрівання під загартування в соляних ваннах при температурі 820±20°C протягом 4 хв., охолодження у маслі та воді, відпустка при температурі 200±10°C протягом 1 години). Браковані вироби лежать поза межами значень вихідного струму. При цьому частота струму намагнічування 400 Гц, а його величина 40 мА. Як показали дослідження, збільшення сили або частоти струму не приводить до помітного підвищення чутливості вимірювань, а характер передаточної залежності залишається незмінним.

Коефіцієнт кореляції між твердістю контрольованих виробів та ЕРС на виході перетворювача дорівнює 0,96, що підтверджує вірогідність контролю за допомогою застосованого перетворювача.

При переході до випробувань виробів іншої конфігурації й розмірів або виготовлених з іншого матеріалу, необхідно запропонованим розрахунком та попередніми експериментами встановлювати область вихідних напруг перетворювача для придатних виробів та перевірити метод (при масовому виробництві) за допомогою відомих методів (Брінелля або Роквелла). Для градування авторами був використаний прилад типу ТКП-1.

Результати проведених досліджень дозволяють рекомендувати обраний перетворювач та методику вимірювань для 100%-вого неруйнуючого контролю якості термічної обробки різних деталей, а сам метод контролю вважати експресним, тому що час контролю не перевищує 1 сек.

#### ВИКОРИСТАННЯ ЧАСТОТНО-БАЛАНСОВОГО МЕТОДУ В СИСТЕМАХ КЕРУВАННЯ ОБЛАДНАННЯМ ЗА СИЛОВИМ ПАРАМЕТРОМ

Перспективним напрямком виміру силових параметрів електромагнітними (магнітопружними) перетворювачами є перехід від аналогової форми подання інформації до частотного. Останнє дозволить

підвищити розрізняльну здатність вимірів, точність, за рахунок відстройки від ряду факторів, що заважають, перешкодозахищеність при передачі інформації, спростити узгодження з ЕОМ.

Звернемося до дослідження частотно-балансового методу сило-вимірювань. Насамперед сформовано блок-схему й розглянуто процеси при струмовихровому частотно-балансовому методі. Фізичний процес, що лежить в основі методу, розглянуто на прикладі роботи модифікації найбільш відомого на цей час магнітоанізотропного перетворювача.

Розглянуто характер зміни вихідного сигналу вимірювального й компенсаційного перетворювачів при зміні частоти струму, що намагнічує. Доказано, що струмовихровий частотно-балансовий метод дозволяє практично повністю відбудуватися від коливань (девіації) значення струму, що намагнічує, а те, що вихідна інформація використовується у вигляді частоти струму, дозволяє забезпечувати авто компенсацію девіації частоти, тому що при знаходженні балансової ( $f_b$ ) частоти відхід частоти автоматично буде скомпенсований. Використання корисної інформації у вигляді частоти дозволяє ефективно застосовувати цифрові вимірювальні прилади високої точності й розв'язної здатності (порівняно з аналоговими) без попередньої обробки інформації.

Для розрахунку частоти струмовихрового балансу розглянуто електричну схему заміщення магнітного кола перетворювача.

При проведенні подальших розрахунків прийнято наступні допущення:

в основному магнітопроводі напруженість магнітного поля в усіх точках пластин відповідає лінійній ділянці залежності  $d = f(H)$ ;

по всій товщині пластин діє напруженість  $H_0$ , а нелінійний розподіл напруженості в матеріалі враховано коефіцієнтом зміни магнітної проникності  $K_m$ . Для розрахунку коефіцієнта  $K_m$  розглянуто ділянку основного магнітопроводу, обмежену шириною полюсів  $\delta$  і відстанню між ними  $\Delta$ .

Отримані графіки залежності балансової частоти від значення контрольованих зусиль ( $f_b = \varphi(\sigma)$ ) і залежності зміни вихідного сигналу вимірювального перетворювача від зусиль ( $U_d = \varphi(\sigma)$ ).

У результаті порівняння цих залежностей зроблено висновки, що при контролі зусиль частотно-балансовим методом (в межах пружних деформацій матеріалу основного магнітопроводу) на  $100 \text{ Н/м}^2$  доводиться  $\Delta f_b = 0,1$  Гц, а при контролі звичайним приладом  $0,06$  мВ. Доказано, що здатність частотного методу значно вище. Погрішність виміру зусиль частотно-балансовим методом не перевищує  $0,3\%$ , тоді як звичайним перевищує  $1\%$ . Погрішність розрахунку вихідних характеристик запропонованою методикою не перевищує  $5\%$  і може бути значно знижена за рахунок урахування енергетичних факторів при розрахунку намагніченості матеріалу магнітопроводу. Спосіб вимірювань раціонально застосовувати для цілого ряду електричних вимірів неелектричних величин.

Таким чином, розроблений метод дозволяє значно підвищити точність контролю зусиль за рахунок

великої розв'язної здатності методу. При цьому практично повністю виключається вплив коливань величини й частоти струму, що намагнічує. Метод дозволяє ефективно використовувати цифрову вимірювальну апаратуру без перетворень вихідної інформації. Відзначаючи переваги частотно-балансового методу, слід зазначити раціональність його застосування в системах керування автоматизованим устаткуванням стосовно до уже працюючих в них подібних перетворювачів.

На кафедрі ТЗЕ на цей час також проводяться цікаві дослідження способу вимірювання зусиль перетворювачами, магнітопровід яких виготовлено з ферорезини с частками однодомного феропорошку (Авторское свидетельство СССР №1517506, Способ измерения усилий магнитоупругими преобразователями. В.Ф.Безотосный и др.). Спосіб дозволяє істотно спростити технологію виготовлення перетворювачів, вони рекомендовані для контролю частоти й амплітуди вібрацій, силовимірювань при значних лінійних деформаціях об'єктів, в тому числі десантуємих, у якості тактильних матричних датчиків та інше.

## ВИСНОВКИ

Дослідження які виконали співробітники кафедри "Теоретична та загальна електротехніка" Запорізького національного технічного університету, що пов'язані з питанням контролю неелектричних та електричних параметрів матеріалів електромагнітними методами дозволяють спростити технологію виготовлення перетворювачів та підвищити точність цілого ряду електричних вимірів неелектричних величин.

## ЛІТЕРАТУРА

- [1] Чаплыгин В.И., Безотосный В.Ф., Полянский Г.А. Токовихревой частотно - балансный метод измерения усилий электромагнитными преобразователями. // Электронное моделирование. - Киев, 1977. - С. 215 - 223.
- [2] Чаплыгин В.И., Безотосный В.Ф. Электромагнитный преобразователь усилий. // Изв. вузов. Электромеханика. - 1977. - №10. - С. 1159 - 1163.
- [3] Безотосный В.Ф., Рябошапка А.Т., Гапонов В.Н. Способ измерения усилий магнитоупругими преобразователями. А.с. СССР 1517506. Бюлл. №48, 1989.
- [4] Безотосный В.Ф., Власенко Э.В. Учет энергетических факторов при расчете намагнитченности ферромагнитных материалов. // Электротехника и электроэнергетика. - 2004. - №1. - С. 13 - 17.
- [5] Безотосный В.Ф., Козлов В.В., Набокова О.В. Современные подходы и перспективные направления разработки систем управления по силовому параметру. // Электротехника і електромеханіка. - 2008. - №3. - С. 5 - 6.

Поступила 10.07.2008