При $M_a = 9$ та $P = 10^{-5}$ домінує вплив похибок квантування 53–61 % та зсуву 15–25 %. Для $P = 10^{-4}$ переважає вплив похибок квантування 48–55 % та зсуву 13–22 %. При $P = 10^{-3}$ суттєвим є внесок похибки квантування 41–50 %, а для $P = 10^{-2}$ похибок квантування 33–38 % та збою ПВЗ 40–47 %, причому частка останньої зростає при збільшенні $n_{e\phi}$.

1. Орнатский П.П. Теоретические основы информационно-измерительной техники. – К., 1983. 2. Калашников И.Д., Степанов В.С., Чуркин А.В. Адаптивные системы сбора и передачи информации. – М., 1975. 3. Ивахив О.В., Пучинский Б.В., Шигера И.Ю. Разностноадаптивная измерительная система // Изв. вузов. Приборостроение. – 1988. – Т. 31. – С. 25–29. 4. Івахів О., Шигера І. Різницево-адаптивна система з фіксованою кількістю приростів та покадровою структурою сигналу // Вісник ДУ "Львівська політехніка". – 2000. – № 389. – С. 100–103.

УДК 621.036.2

Р. Пеленський Національний університет "Львівська політехніка", кафедра ТЗЕ

АНАЛІЗ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ПРОЦЕСІВ В ЕЛЕМЕНТАХ ВИХРОСТРУМОВОГО ТОМОГРАФА

© Пеленський Р., 2001

Розглянуто метод контролю стану теплообмінників атомних та теплових електростанцій. Він базується на математичному моделюванні проходження електромагнітних хвиль у електропровідне середовище. Розроблено ключові принципи комп'ютеризованої томографії стінок теплообмінників.

A method of testing the state of heat exchangers of atomic and steam power plants has been suggested. It is based on the mathematical modelling of the passage of the electromagnetic waves through the heterogeneous media. The key principles of the computer aided tomography of the heat exchangers walls have been developed.

Середньорічні витрати через непрацездатність теплообмінників за даними американського бюро з надійності енергосистем становлять 2,7 млн. американських доларів на один агрегат^{*}. У світовому масштабі такі втрати можна оцінити принаймні в десятки мільярдів доларів. Тому актуальним є створення комп'ютерних систем неруйнівного контролю стану труб атомних та теплових електростанцій. Контроль треба проводити як ззовні, так і зсередини труб. Надійний робот за спеціальною програмою повинен доставляти первинний перетворювач до кожної ділянки теплообмінника, забезпечуючи оптимальний повітряний проміжок, однаковий протягом усього вимірювального процесу.

Найбільші переваги серед придатних для цих цілей методів має вихрострумовий метод, який дає змогу встановлювати діагноз ступеня спрацювання частин теплообмінника та ступінь його руйнування під впливом корозії та агресивного хімічного середовища.

^{*} Belt R.I., Strauss S.D. Advanced Heat-Exchander Reliability-Power, 1991, July.

Первинний перетворювач засилає в стінку теплообмінника електромагнітну хвилю. Робот повинен орієнтувати котушку перетворювача перпендикулярно до стінки, щоб в матеріалі була плоска хвиля. Тоді спрощується моделювання явищ проникнення хвилі та її взаємодії з неоднорідностями. Під час дослідження ступеня спрацювання деталей важливими є концентрація та глибина залягання мікродефектів у вузькому приповерхневому шарі. Для цих цілей використовують хвилі високої частоти. Під час дослідження змін товщини стінок теплообмінника або товщини труби нафто- чи газопроводу під впливом корозії або агресивних реагентів, навпаки, потрібні хвилі низької частоти, які не дуже затухають при проходженні через товщу труби.

Нехай первинним перетворювачем використовується котушка, намотана на фероосерді. Між фероосердям циліндричної форми і стінкою теплообмінника є повітряний проміжок, тому навіть у випадку, якщо циліндричне осердя виконане у підковоподібній формі, магнітний опір системи в основному визначається опором повітряного проміжку. Для спрощення викладення матеріалу розглядається розімкнуте феромагнітне осердя. Напруженість магнітного поля в циліндричному осерді знаходиться на підставі рівнянь Максвелла

$$\operatorname{rot}\overline{\mathbf{H}} = \gamma \overline{\mathbf{E}}\,,\tag{1}$$

$$\operatorname{rot}\overline{\mathrm{E}} = -\mu_{\mathrm{a}} \frac{\mathrm{d}\mathrm{H}}{\mathrm{d}\mathrm{t}}.$$
(2)

Застосувавши операцію rot до першого рівняння, отримуємо

$$\operatorname{rotrot}\overline{\mathbf{H}} = \operatorname{grad}\operatorname{div}\overline{\mathbf{H}} - \nabla^{2}\overline{\mathbf{H}} = \gamma \overline{\mathbf{r}} \operatorname{ot}\overline{\mathbf{E}}.$$
(3)

У зв'язку з тим, що застосована додаткова операція диференціювання, можна накласти умову $div\overline{H} = 0$. Тоді на підставі рівнянь (2) та (3) одержуємо простий вираз

$$\nabla^2 \overline{H} = \mu_a \gamma \frac{dH}{dt}.$$
 (4)

За наявності розімкнутого магнітопроводу напруженості магнітного та електричного полів можна вважати синусоїдними функціями часу. Тоді в комплексній формі рівняння (4) набуває вигляду

$$\nabla^2 \overline{\mathbf{H}} = \mu_a \gamma_j \omega \overline{\mathbf{H}} \,. \tag{5}$$

У циліндричному магнітопроводі напруженість скерована по осі z (вісь магнітопроводу) і залежить лише від координати г. Тобто, рівняння (5) набуває вигляду

$$\frac{1}{r}\frac{d}{dr}\left(r\frac{d\dot{H}}{dr}\right) = j\omega\mu_a\gamma H,$$
(6)

яке можна переписати в такій формі:

$$\frac{\mathrm{d}^{2}\dot{\mathrm{H}}}{\mathrm{d}r^{2}} + \frac{1}{r}\frac{\mathrm{d}\dot{\mathrm{H}}}{\mathrm{d}r} - j\omega\mu_{a}\gamma\dot{\mathrm{H}} = 0. \tag{7}$$

Цьому рівнянню відповідає характеристичне рівняння

$$\lambda^2 + \frac{1}{r}\lambda - j\omega\mu_a\gamma = 0, \tag{8}$$

розв'язком якого буде вираз

$$\lambda_{1,2} = -\frac{1}{2r} \pm \sqrt{\frac{1}{4r^2} + j\omega\mu_a\gamma} \,. \tag{9}$$

 $\dot{H} = A_1 \exp(\lambda_1 r) + A_2 \exp(\lambda_2 r).$

Отже, розв'язок рівняння (7) можна записати у формі

Невизначеності $\lambda_1 r$ та $\lambda_2 r$ при r = 0 розкриваються в одному випадку як 0, в іншому як -1.

На поверхні циліндричного осердя у випадку одношарової котушки

$$\dot{H}_0 = \frac{I}{2d_2},\tag{11}$$

(10)

де d₂ – діаметр проводу, яким намотана котушка.

Розв'язок рівняння (7) можна отримати в функціях Бесселя, якщо рівняння (7) подати у вигляді

$$\frac{d^{2}H}{dr^{2}} + \frac{1}{r}\frac{d\dot{H}}{dr} + a^{2}H = 0,$$
(12)

де $a = \sqrt{-j\omega\mu_a\gamma}$. Тоді

$$\dot{\mathbf{H}} = \mathbf{AJ}_{0}(\mathbf{ar}) + \mathbf{BN}_{0}(\mathbf{ar}).$$
(13)

Функція Бесселя нульового порядку другого роду N_0 перетворюється в безмежність при ar = 0. При протіканні струму через котушку напруженість магнітного поля H на осі магнітопроводу мусить мати кінцеве значення, тому B = 0. Отже,

$$\dot{\mathbf{H}} = \mathbf{A} \mathbf{J}_0(\mathbf{a} \mathbf{r}). \tag{14}$$

На поверхні магнітопроводу напруженість відома (формула 11). Тому при r=r₁, маємо

$$\mathbf{H}_0 = \mathbf{A} \mathbf{J}_0(\mathbf{a} \mathbf{r}_1). \tag{15}$$

Отже,

$$\dot{H} = \dot{H}_0 \frac{J_0(ar)}{J_0(ar_1)}.$$
(16)

Електромагнітна хвиля, проходячи в електропровідне середовище стінки теплообмінника, затухає. При дослідженні степеня спрацювання матеріалу стінок теплообмінника стінку трубки можна розглядати як необмежений простір. Якщо ж досліджується зменшення товщини стінки за рахунок корозії чи інших причин, потрібно враховувати і відбиту від протилежної сторони стінки хвилю.

При проходженні в півбезмежне електропровідне середовище напруженість магнітного поля змінюється згідно з законом

$$\dot{\mathbf{H}} = \dot{\mathbf{H}}_{n} \exp(-\mathbf{p}z), \tag{17}$$

де характеристичний параметр середовища стінки, виражений через параметри матеріалу γ_1 та μ_{a1} і частоту хвилі, має вигляд

$$p = (1+j)\sqrt{\frac{\omega\mu_{a1}\gamma_1}{2}}.$$
 (18)

На підставі другого закону Максвелла (класична електродинаміка) знаходимо вираз для напруженості електричного поля в електропровідному середовищі стінок теплообмінника

$$\dot{\mathbf{E}} = -\mathbf{j}\omega \mathbf{p}^{-1}\boldsymbol{\mu}_{a}\mathbf{H}_{n} \exp(-\mathbf{p}\mathbf{z}).$$
(19)

Lviv Polytechnic National University Institutional Repository http://ena.lp.edu.ua

У випадку, якщо електромагнітна хвиля в стінці теплообмінника плоска $(\vec{E} = \vec{\Theta} \cdot \dot{E}, \vec{H} = \vec{z} \cdot \dot{H})$, для обчислення повної потужності можна використати комплексний вектор Пойнтинга

$$\dot{\vec{S}} = \left[\dot{\vec{E}} \times \dot{\vec{H}}\right],\tag{20}$$

де Н – спряжене значення вектора комплексної напруженості магнітного поля.

Комплексний вектор Пойнтинга характеризує енергетичні можливості локальної області одиничного об'єму.

Якщо підсумувати потужності, зумовлені дією первинного перетворювача на елементарні об'єми стінок теплообмінника, отримуємо сумарні активну та реактивну потужності

$$P + JQ = -\oint \vec{S}d\vec{S}.$$
 (21)

Розділивши активну та реактивну потужності на квадрат модуля вихрового струму середовища стінок теплообмінника, отримуємо активну та реактивну складові опору середовища вихровому струму. Значення цих опорів перераховуються у первинне коло перетворювача через коефіцієнт, що дорівнює квадратові кількості витків одношарової обмотки. Густина вихрового струму є функцією координат r та z, тому вираз для вихрового струму має вигляд

$$\mathbf{i} = \int_{0}^{a} \int_{0}^{h} \vec{\delta} \, d\vec{\mathbf{r}} \, d\vec{\mathbf{z}}.$$
(22)

Густина струму виражається через напруженість електричного поля

$$\vec{\delta} = \gamma \,\vec{E}.\tag{23}$$

Складові комплексного опору, яке вноситься у первинне коло перетворювача, зазнають змін при появі мікродефектів у матеріалі. Найбільш раціональною є розробка таких пристрої повинна бути передбачена можливість вимірювання змін опору принаймні на кількох частотах. Ідентифікація мікродефектів (їх глибини залягання та концентрації) здійснюється за допомогою розробленої математичної моделі. Під час дослідження степеня спрацювання матеріалу труб у модель вводиться сходинкоподібний набір провідностей матеріалу. Цей набір може реалізувати експоненціальний закон розподілу концентрацій мікродефектів або розподіл Гаусса у разі, якщо максимум концентрацій зміщений від поверхні вглиб матеріалу. При цьому наведена вище модель зазнає невеликих змін (інтеграл від 0 до h замінюється сумою інтегралів, де кожний інтеграл відповідає одній сходинці розподілу).

За спеціальною програмою на підставі результатів проведених вимірювань і математичного моделювання комп'ютер здійснює ідентифікацію мікродефектів. При цьому можна отримати концентрацію дефектів, їх глибину залягання і, навіть, усереднені розміри дефекту, також можна усунути вплив повітряного проміжку, фарбового покриття та інших побічних чинників.

Тому, базуючись на сучасних досягненнях механіки руйнування матеріалів, можна встановити часовий ресурс безаварійної експлуатації теплообмінника, спрогнозувати дату подальшого його дослідження або термін заміни. Крім того, побудова комп'ютерних систем пошарового дослідження матеріалів та деталей важливих об'єктів спонукує до поступу в розвитку теорії руйнування матеріалів та довгострокового прогнозування їх властивостей.