

УДК 656.25: 621.318

РАЗГОНОВ А. П., д.т.н., професор,
 ЛАГУТА В. В., к.т.н., доцент,
 БОНДАРЕНКО Б. М., аспірант (ДНУЗТ)

Моделювання оптичних вимірів електромагнітного реле

Вступ

Проблема автоматичного вимірювання величини зазору між якором і полюсним наконечником реле в процесі його роботи безпосередньо пов'язана з можливістю автоматичної діагностики працездатності реле в цілому, у тому числі і з можливістю вимірювання механічних параметрів реле залізничної автоматики.

Для вирішення цього завдання в різний час були запропоновані різні способи і пристрої [1-2], але до цих пір не створено автоматизованого стенду для вимірювання механічних параметрів реле залізничної автоматики без зняття захисного кожуха.

З всіх запропонованих способів тільки спосіб на базі оптичних засобів вимірювання з використанням фотометричних датчиків є прямим і тому найбільш точним способом вимірювання [2]. Проте, реалізація цього способу пов'язана з серйозними технічними труднощами, зокрема, з проблемою точного позиціонування зазору між якором і полюсним наконечником напроти фотометричних датчиків. Крім того, необхідно вирішити проблему оптичного вимірювання змінної ширини зазору між плоскими поверхнями яко-ря і наконечника, що знаходяться усередині прозорого кожуху з органічного скла різної товщини і оптичної щільності з урахуванням можливих спотворень світлового променя і рівномірності поля яскравості його проекції. При цьому необхідно враховувати, що мінімальний вимірюваний зазор може бути зіставленим з довжиною оптичної хвилі випромінювача, що за певних умов може привести до значних дифракційних спотворень оптичного сигналу [3].

Побудова вимірювального каналу

Для побудови оптичного каналу вимірювання необхідне джерело випромінювання і фотоприймач цього випромінювання.

Вимогам до джерел випромінювання світлового променя більшою мірою відповідають лазерні і світлодіодні випромінювачі.

Фотоприймач оптичного каналу призначений для перетворення світлового випромінювання в електричні сигнали. Простими приладами, які повною мірою відповідають вимогам до фотоприймачів є напівпровідникові фотодіоди. Для фотодіодів не потрібна висока живляча напруга, а світлова характеристика відповідає прямій пропорційності фотоструму від освітленості.

Фотодіод може працювати в двох режимах: фотогальванічний (вентильний) — без зовнішньої напруги і фотодіодний — із зовнішньою зворотною напругою.

Залежність струму через фотодіод від напруги і інтенсивності падаючого світла описується формулою

$$I = I_0 \left(\exp \left(\frac{eU_f}{k_B T} \right) - 1 \right) - \eta e \Phi, \quad (1)$$

де I_0 — "темновий" струм; e — електричний заряд електрона; U_f — напруга на діоді; k_B — постійна Больцмана; T — абсолютна температура; η — квантовий вихід носіїв заряду при збудженні світлом (усереднена кількість носіїв, які виникають при поглинанні одного кванта світла); Φ — інтенсивність світлового потоку (фотонів/с). [4]. Перевага вентильного режиму полягає в наступному:

- відсутності зовнішнього джерела живлення;
- меншому рівні шумів (оскільки в цьому режимі відсутній темновий струм).

При $R_H \rightarrow \infty$ (режим холостого ходу) напруга фотосигналу рівна фото-електрорушійній силі. При $R_H = 0$ струм в зовнішньому ланцюзі рівний фотоструму р-п переходу (якщо нехтувати впливом внутрішнього опору областей напівпровідника між р-п переходом і електричними контактами).

Світлова характеристика фотодіода – залежність фотоструму від освітленості – являє собою пряму пропорційність

$$I_f = S_I \Phi, \quad (2)$$

де S_I – чутливість фотодіоду; Φ – освітленість [5].

Загальне рівняння струму, що протікає через фотодіод, який включений у вентильному режимі, з урахуванням фотоструму і струму насичення має вигляд

$$I_f = S_I \hat{O} - I_s \left(\exp \left(\frac{eU_f}{k_B T} \right) - 1 \right), \quad (3)$$

I – струм через фотодіод, А;

I_f – фотострум, А;

I_s – струм насичення, А;

U_f – фото-електрорушійна сила, В;

T – температура, К.

Це рівняння можна переписати

$$U_f = \frac{k_B T}{e} \ln \left(1 + \frac{S_I \hat{O} - I}{I_s} \right). \quad (4)$$

Для фотодіодного режиму

$$I_f = R \left(S_I \hat{O} - I_s \left(\exp \left(\frac{eU_f}{k_B T} \right) - 1 \right) \right) + U_0, \quad (5)$$

де U_0 – зовнішня напруга, В.

Як видно з вищевикладеного, для того, щоб забезпечити оптичні вимірювання величини повітряного проміжку між якорем і полюсним наконечником реле достатньо забезпечити рівень освітленості фотодіода вище за поріг чутливості, при цьому не повинне виникати струму насичення фотодіода.

Найпростішим і доцільнішим представляється вимірювання повітряного проміжку на просвіт (тіньовий принцип), коли з одного боку проміжку встановлений випромінювач, а з іншою – фотоприймач, тоді тінь на приймальній апертурі фотоприймача створюється якорем, полюсним наконечником і коліматором випромінювача. Корисний сигнал визначається розмірами площі поля яскравості S , яка обмежується вище переліченими тінями і визначає освітленість Φ на приймальній апертурі та перетворюється фотоприймачем в напругу U_f або фотострум I_f (в залежності від режиму включення), тобто $S = I_f$. Розрахунок величини повітряного проміжку δ_g між якорем і полюсним наконечником ведеться на рівні h розташування ан-

тимагнітного штифта. У загальному вигляді

$$\delta_g = I_f \cdot k, \quad \text{де } k \left(\frac{M}{A} \right) - \text{коефіцієнт калібрування,}$$

який визначаються при калібруванні фотометричних датчиків крізь скло кожуху. Тоді максимальному сигналу буде відповідати площа коліматора випромінювача, розміри якого відомі. Після калібрування всі виміри площі яскравості, які зроблені за допомогою фотоструму або напруги по шкалі інтерфейсу програми, автоматично відображаються у каліброваних одиницях (метрах, міліметрах і т.д.), або

$$S = I_{fs} \cdot k, \quad (6)$$

де I_{fs} – виміряний фотострум, відповідно площі яскравості на апертурі фотоприймача.

Моделювання вимірювання відстаней

Для вимірювання величини повітряного проміжку достатньо мати значення розмірів коліматору випромінювача (каліброваного отвору або майданчика випромінювання), за умови, що розміри апертури фотоприймача більше проекції поля яскравості корисного сигналу, що сформувалася на ньому. Але необхідно урахувати геометричні особливості фізичного (повітряного) проміжку між якорем і полюсним наконечником.

Основними з багатьох можливих є використання двох форм коліматорів випромінювачів – прямокутної і круглої форми. На рис.1. зображена геометрична модель фізичного проміжку між якорем і полюсним наконечником з проекціями форм коліматорів випромінювача: а) прямокутної форми; б) круглої форми, де: 1 – якорь, 2 повітряний проміжок, 3 – полюсний наконечник, δ_g – відстань для вимірювань, знаходиться на відомому рівні антимагнітного штифта h , H – висота полюса котушки, r – радіус коліматора випромінювача круглої форми.

Розглянемо обидва випадки.

Моделювання повітряного проміжку прямокутною проекцією. При проходженні проміжку між якорем і полюсом котушки проекція набуває форму трикутника або трапеції. У першому випадку площа трикутника OBD з основою δ_n

$$S = \frac{1}{2} H \cdot \delta_n. \quad (7)$$

З подібності трикутників OBD і OAC з основами δ_n і δ_g маємо

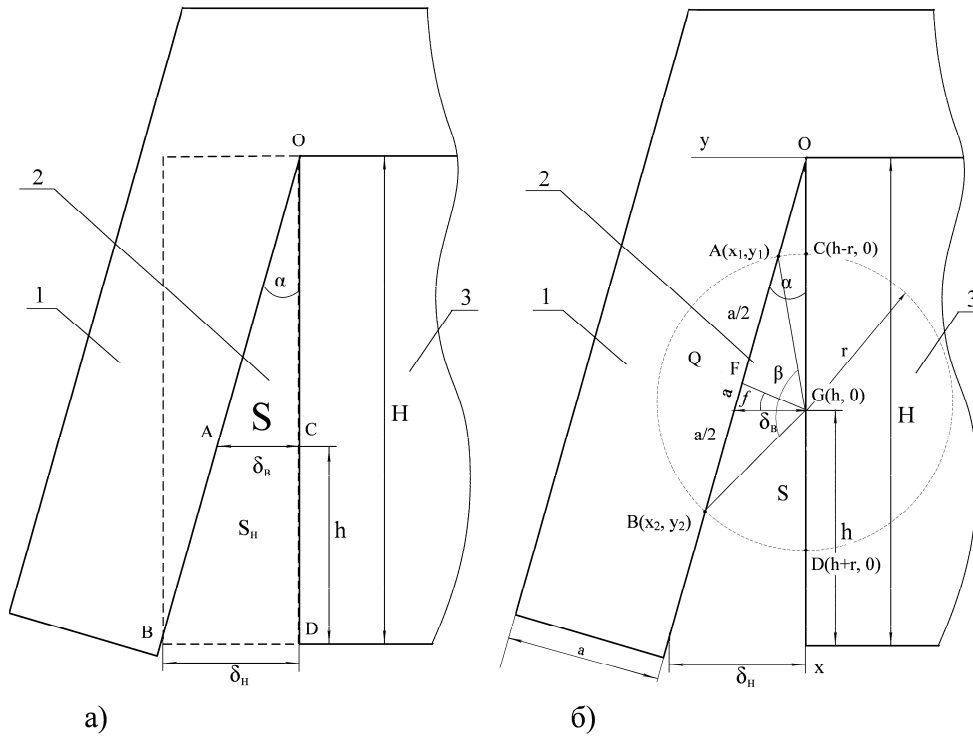


Рис.1. Моделювання просвічування фізичного проміжку між якорем і полюсним наконечником з коліатором: а) прямокутної форми; б) круглої форми

$$\begin{cases} S = \frac{1}{2} H \cdot \delta_h \\ \frac{\delta_h}{\delta_e} = \frac{H}{H-h} \end{cases}.$$

тоді

$$\delta_h = \frac{H \delta_e}{H-h}.$$

З (8-9) отримаємо

$$S = \frac{I^2 \delta_a}{2(H-h)},$$

звідки величина фізичного проміжку

$$\delta_a = \frac{2S(I-h)}{H^2}. \quad (11)$$

У другому випадку, якщо розміри вимірювальної площі обмежені стороною якоря, висотою h та основами δ_h і δ_e , площа цієї трапеції

$$S_h = \frac{\delta_e + \delta_h}{2} h, \quad \operatorname{tg} \alpha = \frac{\delta_e}{H-h}, \quad \operatorname{tg} \alpha = \frac{\delta_h}{H}, \quad (12)$$

тоді

$$\frac{\delta_e}{H-h} = \frac{\delta_h}{H}. \quad (8)$$

З останнього рівняння:

$$\delta_a = \frac{(H-h) \delta_i}{H} \quad (13)$$

(9) Виміряна напруга з фотоприймача пропорційна площі яскравості випромінювача

$$S_h = \frac{\frac{2\delta_h}{H} + \delta_h}{2} h. \quad (14)$$

Максимальна відстань між якорем і полюсним наконечником дорівнює стороні δ_h трапеції

$$\delta_h = 2S_h \left(\frac{H-h}{h} + 1 \right) (2+H). \quad (15)$$

Звідки величина фізичного проміжку на відстані h

$$\delta_e = \frac{H-h}{h} 2S_h (2+H), \quad (16)$$

з урахуванням (6) дістанемо

$$\delta_g = \frac{H-h}{h} 2I_{fs} (2+H) \cdot k. \quad (17)$$

Аналогічно, з урахуванням (6), формулу (11) можна переписати

$$\delta_a = \frac{2I_{fs} (\dot{I} - h)}{H^2} \cdot k. \quad (18)$$

Формулою (17) користуються для визначення величини повітряного проміжку між якорем і полюсним наконечником при висоті прямокутного коліматора випромінювача менше висоти H полюса реле.

Формулою (18) користуються при висоті прямокутного коліматора випромінювача більше або рівній висоті H полюса реле.

Модельовання повітряного проміжку частиною кола. Визначимо відстань між якорем і полюсним наконечником для випадку, коли засвічуваний повітряний проміжок є частиною кола, а область засвічення – півколом, рис. 1 б.

Вважаємо, що відомі наступні величини:

H - висота полюса котушки;

h - відстань від початку координат до центру засвічуваного півкола;

r - радіус півкола області що засвічується;

S - площа повітряного проміжку $\tilde{A}AD$ (частина круга), при цьому $h = H/2$.

Необхідно визначити відстань від якоря до полюсного наконечника δ_g на рівні знаходження антимагнітного штифту h .

Відстань δ_g можна визначити, якщо відоме рівняння прямої OAB $y = kx$, $k = tg\alpha$.

Визначимо, спочатку, кут α між прямою OAB і віссю OX . Якщо центральний кут $\beta = \angle ACB$ відомий, то хорда $AB = a$ пов'язана з ним співвідношенням

$$a = 2r \sin \frac{\beta}{2}. \quad (19)$$

Обчислимо кут β . Площа сегменту круга відповідного центрального кута β

$$Q = \frac{1}{2} r^2 (\beta - \sin \beta), \quad (20)$$

кут β вимірюється в радіанах. Кут β визначимо приблизно із співвідношення (20), представивши функцію $\sin \beta$ рядом Тейлора в околиці точки $\beta = 0$, узявши два перші члени

$$\frac{2Q}{r^2} = \beta - \sin \beta \approx \beta - \left(\beta - \frac{\beta^3}{6} \right) \approx \frac{\beta^3}{6},$$

отже

$$\beta^3 \approx \frac{12 \cdot Q}{r^2}, \quad \beta \approx \sqrt[3]{\frac{12 \cdot Q}{r^2}}.$$

Площа сегменту Q буде

$$Q = \frac{\pi r^2}{2} - S,$$

S - відома величина вимірюваного повітряного проміжку (початкові дані). Тепер можна обчислити хорду a відповідно до виразу (19).

Рівняння кола в декартовій системі координат відповідно рис. 1

$$(x-h)^2 + y^2 = r^2,$$

або

$$y^2 = r^2 - (x-h)^2, \quad y = \sqrt{r^2 - (x-h)^2}.$$

Точки перетину прямої OAB з колом знаходимо з виразів

- координати точки $A(x_1, y_1)$

$$y_1 = \sqrt{r^2 - (x_1 - h)^2}, \quad y_1 = kx_1; \quad (21)$$

- координати точки $B(x_2, y_2)$

$$y_2 = \sqrt{r^2 - (x_2 - h)^2}, \quad y_2 = kx_2. \quad (22)$$

Запишемо систему рівнянь для визначення координат точок перетинів прямої OAB з колом і тангенса кута нахилу прямої

$$\begin{cases} kx_1 = \sqrt{r^2 - (x_1 - h)^2}, \\ kx_2 = \sqrt{r^2 - (x_2 - h)^2}, \\ a = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (kx_1 - kx_2)^2}. \end{cases}, \quad (23)$$

до умов (21)-(22) додамо вимоги стосовно відстані між точками A і B (відстань між точками $A(x_1, y_1)$ і $B(x_2, y_2)$ дорівнює хорді a)

$$\begin{cases} r^2 - (x_1 - h)^2 = k^2 x_1^2, \\ r^2 - (x_2 - h)^2 = k^2 x_2^2, \\ (x_1 - x_2)^2 + (kx_1 - kx_2)^2 = a^2. \end{cases} \quad (23)$$

Враховуючи відоме співвідношення $k = \operatorname{tg} \alpha$, знаходимо відстань що, цікавить

$$\delta_e = kh. \quad (24)$$

Помітимо, що система (23-23') - система нелінійних алгебраїчних рівнянь. Для її вирішення може бути використано чисельний метод Ньютона, або метод найменших квадратів.

Оскільки система (23-23') розв'язується приблизно, розглянемо ще один варіант, винятково геометричний, визначення величини δ_e .

Для даного кола справедливо

$$f = \sqrt{r^2 - a^2} / 4, \quad (25)$$

де величина f – відстань від осі OX до прямої AB (перпендикулярна хорді a).

У виразі (25) всі величини для визначення f відомі. Помітимо, що в $\triangle FEG$ $\angle FGE = \alpha$ (як кути в трикутниках з взаємно перпендикулярними сторонами). Далі, для $\triangle OFG$ справедливо

$$f / h = \sin \alpha.$$

З $\triangle FEG$ одержимо

$$f / \delta_a = \cos \alpha, \quad \delta_a = f / \cos \alpha.$$

І, нарешті

$$\delta_a = f / \sqrt{1 - \sin^2 \alpha} = \frac{f}{\sqrt{1 - f^2 / h^2}} = \frac{f \cdot h}{\sqrt{h^2 - f^2}}.$$

Нагадаємо, що величина f обчислюється відповідно до співвідношення (25).

Підставивши одержані проміжні результати значення f і значення кута β , остаточно дістанемо

$$\delta_a = \frac{hr \sqrt{1 - \sin^2 \beta / 2}}{\sqrt{h^2 - r^2 (1 - \sin^2 \beta / 2)}},$$

$$\beta = \sqrt[3]{\frac{6\pi r^2 - 12S}{r^2}}.,$$

де S визначається відповідно з (6).

Прогнозування стану реле за результатами спостережень. Спостережувані величини δ_e в процесі проведення випробувань одного реле накопичуються за допомогою автоматичного запису в ПК через пристрій узгодження комп'ютера і вимірювального приладу. Виміряні данні δ_e аналізуємо на нормальний закон розподілу і рівномірний закон розподілу, побудувавши гістограми.

У разі більш вірогіднішого нормального закону розподілу величин δ_e обчислюємо середнє значення відстаней δ_e та оцінку дисперсії (вбіркової дисперсії). Про стан реле робимо висновки наступним чином. Рахуємо, що реле працює відповідно до вимог, якщо середнє значення $\bar{\delta}_a$ лежить в інтервалі

$$3\sigma_i - \delta_a^i < \bar{\delta}_a < 3\sigma_i + \delta_a^i,$$

δ_e^i , σ_i - відповідно номінальні значення оцінок середнього та вбіркової дисперсії. При цьому $\bar{\delta}_a$ і $\sigma = \sqrt{D[\delta_e]}$ також перебувають в допустимих номінальних інтервалах. Величини δ_e^i , σ_i обчислюють раніше, працюючи з відомо придатними до експлуатації реле.

Вірогідніший рівномірний закон розподілу виміряних значень δ_e говорить про те, що якір відхиляється майже завжди неоднаковим чином і необхідно провести ретельнішу перевірку і регулювання реле або провести більше спостережень та повторити процес прогнозування.

Аналізувати можна як безпосередньо виміряні величини δ_e^i , i - номер спостереження, так і різниці $\delta_e^i - \delta_e^h$, що доцільніше через кращу наочність.

У запропонованій математичній моделі відносно обчислення відстані δ_a найбільша помилка вимірювання складає 1° . Чим менше кут відхилення, тим вище погрішність вимірювання. Помилка вимірювання кута відхилення якоря зворотно пропорційна квадрату радіусу коліматора випромінювача. Таким чином, для забезпечення якнайменших помилок вимірювання приймальний фотодатчик повинен мати найбільший можливий радіус, приймаючи до уваги конструктивні особливості реле.

Про характер розкиду виміряних величин δ_e можна судити, провівши спектральний аналіз вимірювань $\{\delta_e^i\}$, $i = \overline{1, \dots, N}$, i - номер вимірювання, N - кількість спостережень, за допомогою дискретного перетворення Фур'є.

В амплітудно-частотній характеристиці виміряних зазорів, придатного до роботи реле, повинен бути один, яскраво виражений сплеск амплітуди, якщо якір відхиляється на одну і ту ж величину. Відповідна частота сплеску визначається експериментально в серії дослідів випробовуючи справні реле. Рівномірний спектр свідчитиме про неоднакові відхилення якоря в процесі серії випробувань одного приладу.

Висновки

Розроблено дві моделі оптичних коліматорів випромінювача для визначення положення якоря реле при русі прямокутної і круглої форми.

Література

1. *Совершенствование методов обслуживания и эксплуатации устройств СЦБ: Отчет по НИР / ЦНИИ МПС.* - 553-У-76-78. – Свердловск, 1978. – 162 с.
2. *Стенд для проверки реле СЦБ. Разработка предложений по созданию стенда на базе КТС-ЛИУС-2.* Отчет по НИР / ДИИТ. - 353/3803. – Днепропетровск, 1983. – 54 с
3. *Ваганов Р. Б., Каценельбаум Б. З.* Основы теории дифракции. – М., Наука, 1982. – 272с.
4. *Титце У., Шенк К.* Полупроводниковая схемотехника / Справочное руководство / Пер. с нем. – М.: Мир, 1983. 512 с.
5. *Бонч-Бруевич В.Л., Калашиников С.Г.* Фізика напівпровідників. – М.: 1977. – 672 с.

Резюме

У статті запропоновано побудову оптичного каналу вимірювання фізичного проміжку між якорем і полюсом реле, з моделюванням двох основних геометричних форм коліматорів випромінювача круглої і прямокутної форми

В статті пропонується побудова оптичного каналу вимірювання фізичного зазору між якорем і полюсом реле, з моделюванням двох основних геометричних форм коліматорів випромінювача круглої і прямокутної форми

Construction of optical channel measuring physical gap between an anchor and pole of relay simulation of with two basic geometrical kollimator shapes for the emitter of round and rectangular form is proposed

Ключові слова: оптичний канал, реле, коліматор, параметри реле

Поступила 10.06.2011 р.